

на правах рукописи

Красильников Сергей Витальевич

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДВУХ-
ФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ГОРЕНИЯ В ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ ТОПКЕ С
УЧЕТОМ ШЛАКОУЛАВЛИВАНИЯ**

05.14.14 – тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2003

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент
Заворин А.С.

доктор физико-математических наук, с. н. с.
Старченко А.В.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Бубенчиков А.М.

кандидат технических наук

Захарова Л.Г.

Ведущая организация

Защита состоится _____ 2003 года в ____ часов на заседании
диссертационного совета К 212.269.04 в Томском политехническом универ-
ситете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина 30, корпус 4, ауд. 406.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Заворин А.С.

Актуальность работы

Прогнозирование поведения минеральной части углей в трактах котельных агрегатов остается одной из актуальных задач для энергетики, так как с этим связано обеспечение надежной работы тепловых электростанций. Этот вопрос имеет особое значение при современном состоянии отечественной теплоэнергетики вследствие истощения расчетного ресурса основного оборудования на многих электростанциях, расширения использования не-проектных или несжигавшихся ранее топлив, потребности освоения энерго-, ресурсо-, и экологосберегающих технологий топливоиспользования. Вместе с тем получение сведений, необходимых для предпроектной проработки технических вариантов, апробации мероприятий по реконструкции или тестированию наладочных мероприятий, путем промышленных испытаний или физического моделирования процессов имеет существенные ограничения из-за большой трудоемкости и высокой стоимости. Одним из выходов в такой ситуации является применение численного моделирования для расчета параметров и оценки конструктивных особенностей энергоустановок.

Среди моделей процессов в котле, определяемых свойствами минеральной части угля, моделирование условий шлакообразования и компьютерный расчет коэффициента шлакоулавливания являются ключевыми, поскольку от результата зависит надежность моделирования всех последующих взаимодействий минеральной составляющей топлива с поверхностями нагрева в топке и газовом тракте. Учитывая определяющую роль аэродинамики для организации пылеугольного факельного сжигания в энергетических котлах, необходимо исследовать шлакообразование в комплексе с моделированием двухфазных течений, тепло- и массообмена при горении. Предшествующими работами в этом направлении применительно к топкам котлов подготовлены возможности и показана актуальность создания программных продуктов, отвечающих современным требованиям к математическому аппарату, численной методике и графическому интерфейсу, и наряду с этим простых в пользовании, наглядных в представлении результатов моделирования, удовлетворяющих по быстродействию и точности выполненных расчетов. Это соответствует основным тенденциям деятельности ведущих мировых производителей прикладного программного обеспечения для персональных компьютеров.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями НИР Томского политехнического университета в рамках темы 6.71.02 ЕЗН Минобразования РФ и в продолжение исследований, выполненных ранее в ТПУ в соответствии с научно-техническими программами «Исследование и освоение сжигания канско-ачинских углей на электростанциях КАТЭКа на 1981-1985 годы» ГКНТ при СМ СССР, «Сибирь» СО АН СССР, государственной НТП «Экологически чистая энергетика».

Цель работы

Развитие математических моделей пространственных аэротермохимических топочных процессов, апробированных в проектно-конструкторской

практике, с учетом упрощенной модели шлакоулавливания; создание усовершенствованного пакета прикладных программ для расчета и визуализации характеристик топочной среды; численное исследование влияния параметров двухфазных течений на степень улавливания шлака применительно к реальным топкам котельных агрегатов.

Для достижения данной цели сформулированы следующие основные задачи исследования:

- компоновка и описание математической модели поведения двухфазной среды при факельном горении полидисперсного пылеугольного топлива и осаждения минеральных остатков на ограничивающие поверхности;
- применение новейших вычислительных схем для повышения точности результатов и сокращения времени счета;
- проведение вычислительных экспериментов, позволяющих оценить влияние элементов конструкции, режимных параметров, условий ввода топлива и воздуха на аэродинамические и тепловые характеристики реальной топки;
- расчетное определение локального коэффициента шлакоулавливания в исследованном поле характеристик топки с использованием систематизированных данных по минеральной части углей;
- выявление возможностей управляющего воздействия режимно-конструктивных факторов на распределение минеральной части пылеугольного факела между шлаком и уносом на примере экспериментально изученной топки;
- разработка пакета прикладных программ расчета и визуализации результатов вычислений для платформы WINDOWS с многофункциональным современным интерфейсом.

Научная новизна состоит в применении двухфазной модели с раздельным математическим описанием поведения газовой и полидисперсной среды при факельном сжигании угольной пыли в топочной камере, разработке сопряженной модели теплообмена и гидродинамики жидкой шлаковой пленки, образующейся на стенках камеры сгорания. Впервые для топки с жидким шлакоудалением открытого типа с прямым вдуванием угольной пыли выполнены численные исследования шлакоулавливания в комплексе с эффективностью горения, аэродинамики и теплоотдачи, на основании которых установлены особенности влияния варьируемых факторов на параметры работы топки.

Практическая значимость определяется готовым к использованию программным продуктом, пригодным для вычисления результатов поведения двухфазной среды «воздух – пылеугольное топливо», применимых при проектировании и реконструкции топочных устройств, а также систем газоочистки тепловых электростанций.

Разработанный программный комплекс FIRE 3D передан для использования в ООО «Сибтерм», в специализированную научно-

исследовательскую организацию по обследованию объектов котлонадзора ООО «Теплоуниверсал». Результаты вариативных расчетов для котла БКЗ-220-100ЖШ используются ТЭЦ ОАО «Юргинский машиностроительный завод» для анализа эксплуатационных режимов и выработки наладочных мероприятий.

Материалы выполненных исследований включены в лекционный курс и лабораторный практикум для специальности 101300 (котло- и реакторостроение) в Томском политехническом университете. Пакет программ опробован в НИРС кафедры ПГС и ПГУ ТЭФ Томского политехнического университета и на занятиях по вычислительным методам студентами и преподавателями кафедры.

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, подтверждается хорошей сходимостью результатов вычислений с экспериментальными и вычислительными данными других авторов.

Тестовые расчеты, выполненные с использованием разработанной численной модели для гидромоделей и натуральных пылеугольных топок, показали хорошее воспроизведение результатов экспериментальных исследований.

На защиту выносятся:

- математическая модель и развитый на ее основе пакет прикладных программ для исследования аэродинамики, горения, теплообмена и образования шлаковой пленки в пылеугольных топках паровых котлов;
- результаты моделирования поведения газодисперсной смеси в топках с жидким шлакоудалением на примере котла БКЗ-220-100ЖШ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии» (Томск, 1998 г.), IV научно-техническом семинаре и V, VI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 1998, 1999, 2000 г.г.), V областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 1999 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях» (Красноярск, 2000 г.), II семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Томск, 2001 г.), 10 научной конференции по двухфазным течениям «10th Workshop on Two-Phase Flow Predictions» (Merseburg, Германия, 2002 г.), XXVI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2002 г.), на научных семинарах кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета (1998 – 2002 г.г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (95 наименований) и приложения. Работа содержит 151 страниц текста, 6 таблиц и 75 рисунков.

Личное участие автора

Автором выполнены работы по созданию программного комплекса FIRE 3D для расчета объемных топочных процессов на основе пакета прикладного программирования DELPHI. Разработаны методики проведения вычислений и обработки полученных данных, проведены вычислительные эксперименты и анализ их результатов. Разработка вычислительной задачи, постановка задач исследований, обсуждение методики вычислительных экспериментов и полученных результатов выполнены с участием научных руководителей к. т. н. Заворина А.С. и д. ф.- м. н. Старченко А.В.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы.

В первой главе диссертации дается подробное описание современного представления об аэродинамических и тепломассообменных процессах, сопровождающих факельное сжигание пылеугольного топлива в топках крупногабаритных котлоагрегатов. Дается анализ поведения шлаковых частиц в топках с жидким и твердым шлакоудалением, описываются механизмы образования шлаковой пленки на стенках камеры сгорания. Представлены сведения о классификации частиц угля и золы по их содержанию минеральных компонентов.

На основании обзорного материала делается вывод о необходимости использования сведений о структуре шлаковых частиц (в первую очередь по параметрам плавления) при разработке модели шлакования топочных поверхностей.

Рассмотрены также основные тенденции исторического развития и современное состояние подходов математического моделирования процессов аэродинамики, тепломассообмена, движения, воспламенения и горения частиц при факельном сжигании пылеугольного топлива в топках паровых котлов. Определены основные компоненты модели и численные подходы для ее реализации. Сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются математические основы физической модели для исследований в связи с выбранными целями. Наиболее подходящим методом для моделирования процессов шлакоулавливания является метод, совмещающий эйлеров и лагранжевы подходы для описания движения га-

зов и взвешенных частиц в топке парового котла. При этом общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе описаны на основе эйлерава способа представления, т.е. используются пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Лагранжев подход применяется для описания движения и теплообмена одиночных частиц топлива 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 представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам.

Полидисперсность частиц топлива учитывается путем выделения основных фракций по функции Розина – Раммлера, определяющей рассеивочные характеристики угольного топлива после помола. Поскольку пылеугольное топливо перед сжиганием подвергается сушке, считается, что в топку поступают частицы, не содержащие влаги.

Перемещаясь по топочному объему, угольные частицы нагреваются за счет радиационно-конвективного теплообмена, начинается выход летучих компонентов, их воспламенение и горение и догорание коксового остатка. Предполагается, что газовая среда в топке может состоять из химически инертных молекулярного азота N_2 , двуокиси углерода CO_2 , паров воды H_2O , а также реагирующих O_2 , CO и летучих.

В этом случае математическая модель включает:

1). Газовая фаза

Уравнение неразрывности

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

Уравнения баланса массы газовых компонентов

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

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

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

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

$$\frac{\partial \rho C_{CO_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO_2} + (1 + \beta_{CO}) J_{CO}; \quad (6)$$

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

Уравнения движения

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

Уравнение энергии

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

Уравнение состояния

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

2). Дисперсная фаза

Для моделирования движения частиц используется лагранжев подход, суть которого заключается в следующем. Весь спектр частиц пылеугольного топлива, поступающего в топочную камеру, разбивается на N групп. Разбиение осуществляется по размерам на основе зависимости Розина – Раммлера или вручную на основе данных экспериментального анализа фракций после обработки угля мельницами. При этом считается, что поведение каждой группы частиц может быть охарактеризовано поведением ее представителя – пробной одиночной частицы. Т. е. свойства, которыми в настоящий момент времени обладает частица-маркер, распространяются на все частицы группы, которую представляет частица-маркер. Для расчета параметров, характеризующих состояние частицы-маркера, используется следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

Уравнения движения частицы-маркера i – ой группы,

$$\frac{d\tilde{U}_j^i}{dt} = \frac{\tilde{U}_j - \tilde{U}_j^i}{\tau_i} + g_j; j = 1, 2, 3, \quad (11)$$

$$\tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3c_{D_i} \rho |\tilde{U}^i - \tilde{U}|}; \quad c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{Re_i} (1 + 0,15 Re_i^{0,687}) & Re_i \leq 1000; \\ 0,44; & Re_i > 1000; \end{cases}$$

$$Re_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j)^2} d_{pi}}{\mu}$$

где $\tilde{U}_j^i$ - компоненты скорости частиц; $\tilde{U}_j = U_j + U'_j$ - компоненты скорости газа; ρ_p - плотность угля; d_{pi} - размер частиц i – ой группы; c_{D_i} - коэффициент сопротивления частиц; τ_i - время их релаксации; турбулентные пульсации скорости газа U'_j выбираются случайным образом на основе принятого нормализованного распределения Гаусса со среднеквадратичным отклонением, равным $\frac{2}{3}k$, т.е. $U'_j = \xi_j \sqrt{\frac{2}{3}k}$, $|\xi_j^2| = 1$; k - энергия турбулентности. Значение ξ_j

изменяется с помощью датчика случайных чисел в процессе движения частицы в исследуемом пространстве через отрезок времени

$$\tau_T = \min \left[\frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3}}k}, \frac{L}{|\tilde{U}^i - \tilde{U}|} \right], \text{ где } L = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} - \text{масштаб турбулентности.}$$

Компоненты скорости частиц, не отмеченные волной (U'_j), являются средними скоростями, осредненными турбулентными пульсациями. Эти и другие параметры полета частиц-маркеров осредняются после получения достаточного количества траекторий из одной точки.

Уравнения тепломассообмена и горения частиц,

$$\frac{dm_i}{dt} = -\dot{M}_i^{vap} - \dot{M}_i^{char}, \quad (12)$$

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = Q_{char} \dot{M}_i^{char} + \pi d_{pi}^2 [\alpha_{conv} (T - T_i) + \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4)] - Q_{vap} \dot{M}_i^{vap}. \quad (13)$$

Здесь m_i - масса одиночной частицы с диаметром d_{pi} ; c_p - теплоемкость угля; Q_{char} - калорийность кокса; Q_{vap} - тепло, необходимое для выхода летучих; ε_p - степень черноты частицы; α_{conv} - коэффициент конвективной теплоотдачи одиночной частицы: $\frac{\alpha_{conv} d_{pi}}{\lambda} = 2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}$; $\lambda = \mu c_p / \text{Pr}$ - коэффициент теплопроводности газа. T_i - температура i -ой частицы угля.

При определении массовой скорости выхода летучих $\dot{M}_i^{vap}$ используется соотношение (закон Аррениуса),

$$\dot{M}_i^{vap} = k_{vap} \exp\left(-\frac{E_{vap}}{R_0 T_i}\right) \cdot f_{vo} \cdot m_{oi}, \quad (14)$$

где m_{oi} - начальная масса сухой частицы с диаметром d_{pi} ; f_{vo} - массовая доля летучих в сухом угле; k_{vap} - предэкспонент; E_{vap} - энергия активации.

Скорость горения коксового остатка зависит от кинетической скорости химической реакции горения углерода и от интенсивности диффузии окислителя к поверхности частицы,

$$\dot{M}_i^{char} = \pi d_{pi}^2 \rho C_{O_2} \frac{K_K K_D}{K_K + K_D}, \quad (15)$$

$$K_K = k_{char} \exp\left(-\frac{E_{char}}{R_0 T_i}\right).$$

Для K_D используется зависимость $K_D = \frac{D_{O_2}}{d_{pi}} (2,0 + 0,16 \text{Re}_i^{0,667})$;

$$D_{O_2} = 16 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,9}.$$

3). Влияние дисперсной фазы на газовую

В описанной выше математической модели необходимо определить члены в уравнениях переноса, которые представляют влияние частиц на ха-

рактеристики несущей среды: J_{vap} , J_{char} , F_j , Θ , S_k , S_H . В использованном здесь смешанном эйлерово-лагранжевом способе моделирования аэродинамики, тепломассообмена и горения в камере сгорания котлоагрегата учет обратного влияния частиц на газовую фазу выполняется следующим образом.

Поскольку решение уравнений будет осуществляться численно, то рекомендуется использовать метод контрольного объема. Согласно которому, область исследования разбивается на конечное число непересекающихся объемов. Значения искомых функций внутри каждого объема могут считаться однородными. При последовательном расчете траекторий движения частиц-представителей каждой группы с учетом изменения их массы, скорости, положения и температуры для каждого контрольного объема вычисляются значения J_{vap} , J_{char} , F_j , Θ , S_k , S_H по следующим формулам.

$$J_{vap} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{vap}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}, \quad (16)$$

$$J_{char} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{char}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}, \quad (17)$$

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[\frac{U_j^i - U_j}{\tau_i} \dot{m}_i t_i - \frac{\Delta m_i}{m_{oi}} \dot{m}_{oi} U_j^i \right]; j=1,2,3, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Theta = & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[Q_{char} \Delta m_i^{char} + \bar{m}_i c_p \Delta T_i - Q_{vap} \Delta m_i^{vap} \right] \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} - \\ & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[c_p T_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 \right] \dot{m}_{oi} + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 + \\ & + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\pi d_{pi}^2}{m_{oi}} \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] \dot{m}_{oi} t_i \end{aligned} \quad (19)$$

$$S_k = \frac{2k}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i + T_L}; T_L = \frac{0,41k}{\varepsilon}, \quad (20)$$

$$S_H = \frac{\varepsilon_p}{V} \sum_{i=1}^N \pi d_{pi}^2 (4\sigma T_i^4 - H) \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} t_i. \quad (21)$$

Здесь N – число частиц-представителей прошедших через рассматриваемый контрольный объем, имеющий размер V ; $\Delta m_i = \Delta m_i^{vap} + \Delta m_i^{char}$ – изменение массы i – ой частицы в процессе выхода летучих и горения коксового остатка за время прохождения ею данного контрольного объема; m_{oi} – начальная масса частицы представителя; $\dot{m}_{oi}$ и $\dot{m}_i$ – начальный и текущий массовые расходы частиц данной фракции; t_i – время прохода i – ой частицы через контрольный объем V ; $\bar{m}_i$ – средняя масса i – ой частицы в контрольном объеме; ΔT_i – изменение температуры частицы в контрольном объеме V .

Учет образования шлаковой пленки осуществляется с использованием решения Маршака¹, распространенного на пространственный случай. Со-

¹ Маршак Ю.Л., Рыжаков А.В. Шиповые экраны топок паровых котлов. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.

гласно предложенному подходу температура шлаковой пленки определяется из:

$$q_{\Pi} = \sigma \varepsilon_T (T_{\Phi}^4 - T_{\Pi}^4) + \alpha (T_{\Phi} - T_{\Pi}),$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, ε_T - степень черноты топки, T_{Φ} - температура факела, α - коэффициент теплоотдачи, T_{Π} - температура поверхности движущейся шлаковой пленки.

Решение задачи средней скорости по сечению пленки имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \bar{w}_X = & \frac{\rho_{ш} g \delta_{\Pi}^2}{\mu_0 \left(\ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^3} \left[\frac{\tau_g}{\rho_{ш} g \delta_{\Pi}} \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \left(\frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) + \right. \\ & \left. + 2 \left(\frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) - 2 \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \left(\ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^2 \right] \end{aligned},$$

здесь $\rho_{ш}$ - плотность шлаковой пленки, μ_0 - относительная вязкость шлака на данном участке, μ_{Π} - вязкость шлака при заданной температуре, $\mu_{\Pi} = \mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)$. $\mu(T) \frac{dw_x}{dz} = \tau_g$ - касательное напряжение топочных газов.

С другой стороны, уравнение изменения массы шлаковой пленки в интегральной форме записывается как:

$$\left(\rho_{ш} \bar{w}_X \delta_{\Pi} \right)_{out} - \left(\rho_{ш} \bar{w}_X \delta_{\Pi} \right)_{in} = SW, \quad (22)$$

где SW – интенсивность осаждения шлаковых частиц из топочного пространства на рассматриваемом участке стенки единичной глубины. Отсюда получим:

$$\delta_{\Pi} = \left\{ \frac{\left(\rho_{ш} \bar{w}_X \delta_{\Pi} \right)_{out} \cdot \mu_0 \left(\ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^3}{\rho_{ш}^2 \left[\frac{\tau_g}{\rho_{ш} \delta_{\Pi}} \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \left(\frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) + 2g \left(\frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) - 2g \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - g \left(\ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^2 \right]} \right\}^{1/3} \quad (23)$$

Таким образом, порядок расчета температуры шлаковой пленки следующий. Начиная с верхних сечений топки, где не образуется шлаковая пленка, из (22) получаем $\delta_{\Pi} = 0$ (т.к. $SW = 0$). Если же осаждение частиц есть, то расчет производится по выше приведенным формулам. Заметим, что формулу (23) легко можно распространить на случай наклонной поверхности, для чего следует заменить g на $g \sin \alpha$, α – острый угол между горизонтом и поверхностью.

В третьей главе приводится описание численного метода расчета турбулентных двухфазных реагирующих течений в областях со сложной геометрией.

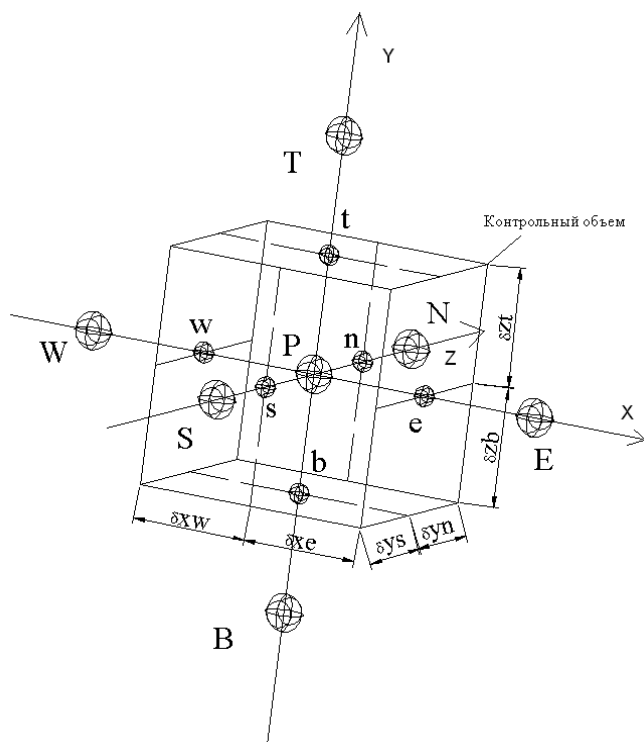


Рис. 1. Контрольный объем

W, E, S, ... - точки скалярных величин
w, e, s, ... - точки компонент скорости.

Теоретическую основу для изучения вихревых течений вязкой жидкости составляют уравнения Навье-Стокса или Рейнольдса. Однако в силу нелинейности и взаимосвязанности этих уравнений их решение в общем случае может быть найдено лишь численно. Эффективность и точность используемого при получении приближенного решения вычислительного алгоритма приобретает все большую важность. Доминирующим методом в численном моделировании дозвуковых течений является блестяще зарекомендовавший себя алгоритм SIMPLE Патанкара-Сполдинга. Этот метод весьма технологичен при про-

граммной реализации, удовлетворяет требованиям консервативности, позволяет с помощью коэффициентов релаксации управлять ходом вычислительного процесса.

Согласно этому методу весь объем расчетной области разбивается на множество непересекающихся контрольных объемов (рис. 1) по такому критерию, что каждая узловая точка дискретизации находится в своем контрольном объеме. Далее, все уравнения интегрируются по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используют кусочные профили, которые описывают поведение функции в промежутке между выбранными узловыми точками. В результате находят дискретный аналог заданной функции с использованием некоторого количества рядом лежащих узловых точек. Полученный дискретный аналог выражает точное интегральное сохранение массы, количества движения и энергии на любом количестве контрольных объемов, следовательно, на всей расчетной области в целом.

В данной работе проводился поиск путей повышения эффективности применения алгоритма SIMPLE при решении системы уравнений Навье-Стокса. В частности, при решении тестовой задачи о движении жидкости в прямоугольной камере было установлено преимущество использования схем второго порядка QUICK и MLU, в значительной степени минимизирующих схемную вязкость, по сравнению со схемой «пятой степени» Патанкара.

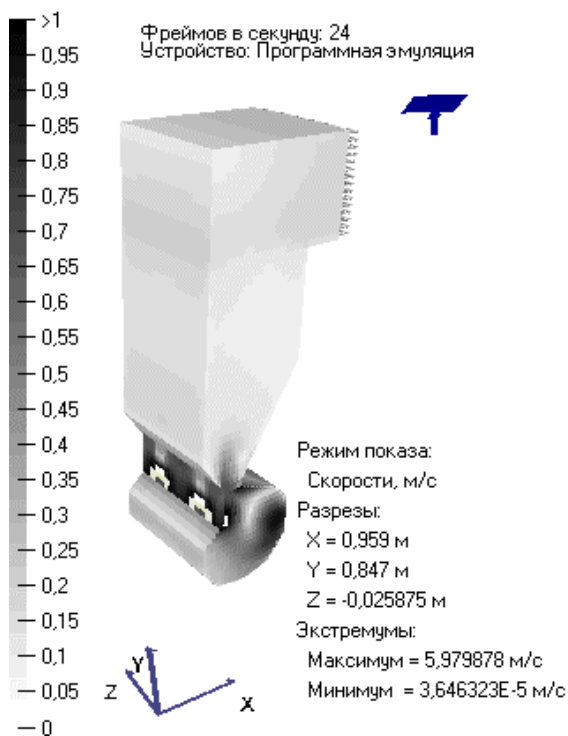
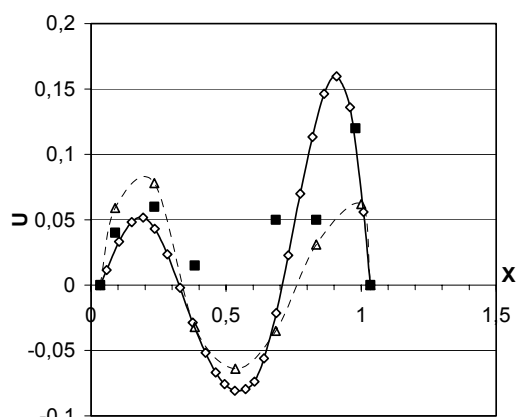


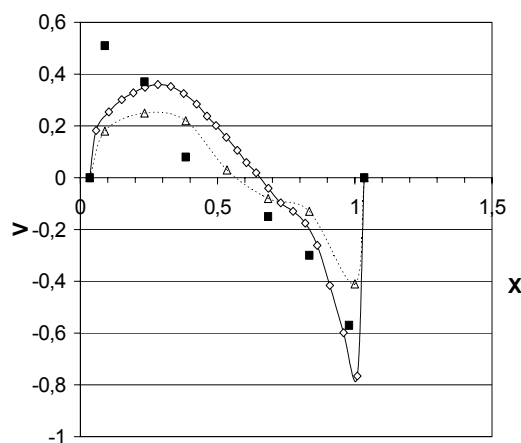
Рис. 2. Топка ЦКТИ.

Топка ЦКТИ (рис. 2), на которой тестировалась численная модель в изотермических условиях, представлена экспериментальными материалами, полученными в ИТФ СО РАН. На рис. 3 изображены данные по изменению компонент скорости U , V , W вдоль отрезка прямой по координате X , при $Y=0,607$ м и $Z=0,204$ м. Сплошной линией отмечены расчетные данные, которые по своему профилю удовлетворительно совпадают с экспериментом и расчетом Д.В. Красинского².

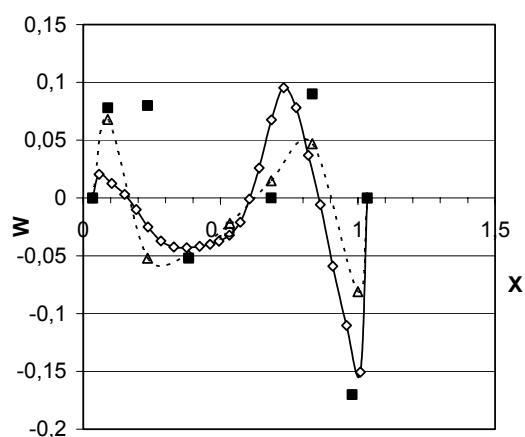
Проверка модели в неизотермических условиях производилась на экспериментах, выполненных для топки БКЗ-220-100ЖШ (рис. 4) в натурных условиях до реконструкции котла.



а) Распределение скорости U



б) Распределение скорости V



в) Распределение скорости W

Рис. 3. Сравнение составляющей скорости среды по глубине топки ЦКТИ.

- ◇— расчетные данные программы Fire 3D
- экспериментальные данные²
- △- расчетные данные Красинского Д.В.²

² Keyno A.W., Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Rychkov. Experimental and numerical modeling of the vortex furnace aerodynamics // Russ. J. Eng. Thermophys. – 1996. – Vol. 6. – No. 1. – P. 47-62.

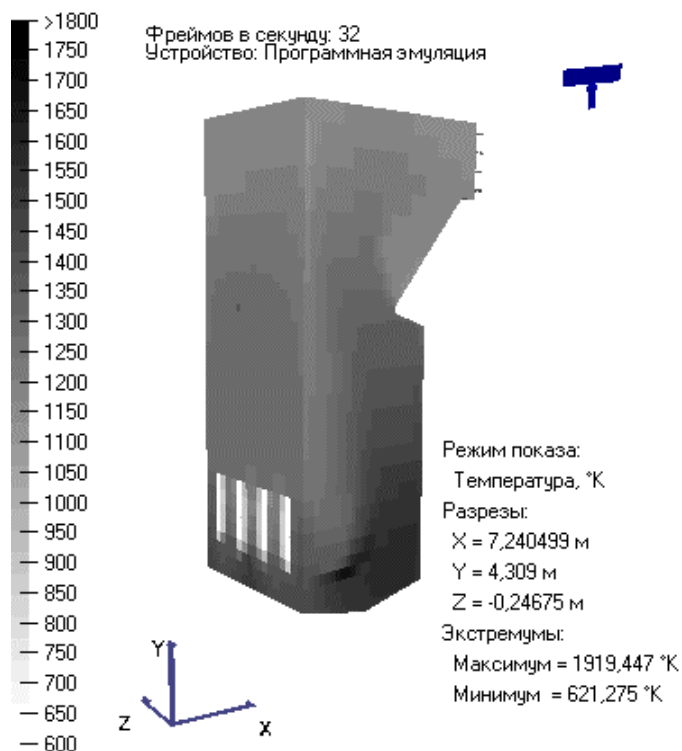


Рис. 4. Температурные поля топки котла БКЗ-220-100ЖШ.

Котел БКЗ-220-100ЖШ относится к призматическому геометрическому виду топочных камер. Компьютерная модель котла, которая использовалась в расчетах, имеет аэродинамический выступ и обладает следующими основными характеристиками. Высота котла 24,9 метра, ширина 8,64 метра, глубина в районе горелок 7,74 метра. Горелки расположены на фронтальной стороне топочной камеры. Горелки имеют высоту 3,12 метра и ширину $\sim 0,4$ метра. Направление подачи аэросмеси из горелок составляет 30° к горизонту до реконструкции и 15° после. В горизонтальной плоскости горелки располагаются под

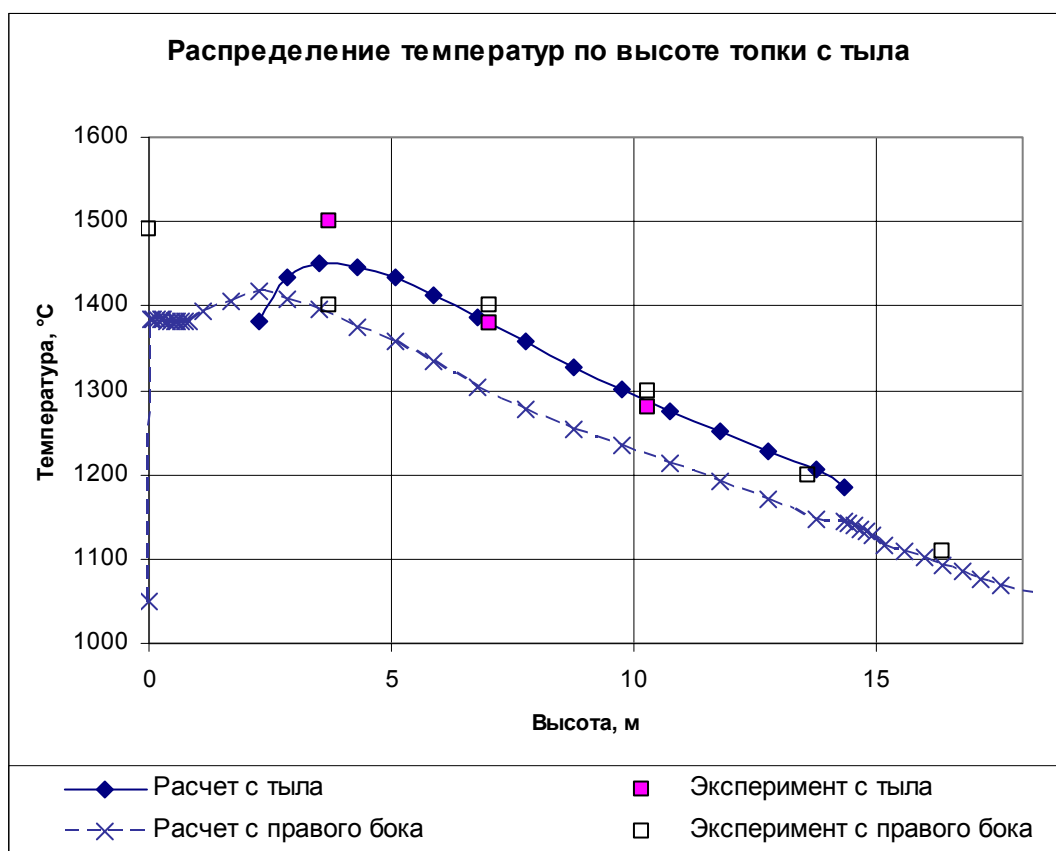


Рис. 5. Распределение температур по высоте топки БКЗ-220-100ЖШ возле стенки с тыльной и правой сторон.

следующими углами: -15° , -7° , 7° и 15° . Углы рассчитаны так, чтобы струи сходились к осевой линии тыльной стороны.

Смесь подается равномерно по всем горелкам со скоростью 23,3 м/с в каждой горелке при температуре 181°C . В качестве окислителя подается обычный воздух. Расход топлива через каждую горелку 3,4 кг/с. При вычислительных экспериментах, как и при эксплуатации, использовался назаровский уголь с помолом $R_{90} = 62\%$ и $R_{200} = 20\%$. Эта топка относится к топкам с жидким шлакоудалением с обмуровкой низа топки до высоты 5,75 м от пода.

Замеры температуры, концентрации кислорода и других параметров производились по высоте топки на расстоянии 0,6 м от стенки через технологические лючки. Измерения проводились на расстоянии 4,32 м от боковой стенки для измерений на тыльной стороне (по центральной линии топочной камеры) и 3,87 м от фронта для измерений на правой стороне топочной камеры. Результаты сравнения приведены на рисунке 5.

Как видно из графиков, имеет место удовлетворительное совпадение между расчетными и экспериментальными данными.

В четвертой главе представлены результаты вычислительных экспериментов, проводившихся для топки котла БКЗ-220-100ЖШ для разных условий сжигания топлива. Выбор данного котлоагрегата обусловлен доступностью материала по режимам эксплуатации топочной камеры на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета, где ранее проводилась работа по исследованию процессов, происходящих в данном котле при сжигании назаровского угля.

Для воспроизведения вариативных условий работы топочной камеры и оценки осаждения шлака программа проведения вычислительного эксперимента была разбита на несколько частей. В первой части исследуется влияние перераспределения топливоподачи по горелкам, а также изменение вертикального угла оси горелок. Вторая часть нацелена на анализ роли дисперсного состава топлива в протекании аэротермохимических процессов и шлакоулавливания в топке котла. В третьей части влияние изменения геометрии топки путем установки дополнительного пережима разной глубины напротив верха горелок.

Проведенные расчеты показали, что условия подачи аэросмеси в топку котла оказывают значительное влияние на организацию процессов горения, распределения тепла по теплообменным поверхностям, осаждение недогоревших частиц и их золовых остатков на стены топочной камеры.

При повышенных температурах в зоне осаждения по причине недожога частиц в горелочной струе на некоторых поверхностях топки может проявиться эффект «доменной печи» – когда в шлаковой пленке на гарнисаже обмуровки выделяются чистые металлы и их соединения, незапланированные для котлоагрегата. Возникают частые аварийные остановки котла для снятия этих отложений, обладающих большой прочностью и малой текучестью для номинальных температур в этих зонах, и, в общем случае, оборудо-



Рис. 6. Осаждение золовых остатков (%) в топке котла БКЗ-220-100ЖШ при перераспределении нагрузки на разные горелки.

рез все горелки подается топливо) наблюдается при перенаправлении пылеугольной топливной смеси на внешние от плоскости симметрии горелочные устройства (горелки 1-4). Такой характер сжигания обусловлен тем, что горение частиц топлива происходит на более протяженных участках реагирующей струи до ее поворота у тыльной стенки. Такой вариант перенаправления подачи топлива уменьшает осаждение шлака на стенки камеры сгорания (рис. 6) до 22% и способствует лучшему горению топлива и повышению коэффициента полезного действия котлоагрегата.

При исследовании влияния изменения угла между осью горелки и горизонтальной плоскостью (угол менялся в пределах от -10° до -30° через 5°) расчеты показали, что при -30° имеет место некоторое возрастание концентрации кислорода и температуры смеси на выходе из топки по сравнению с вариантом -10° , причем интенсивность осаждения частиц меняется незначительно (рис. 7). По всей видимости, это связано с большим осаждением (при -30°) недогоревших частиц с коксовым остатком, что, несомненно, является фактором, способствующим металлизации пода топки. Входящая в топку под большим углом к горизонту аэрозоль под действием радиационного и конвективного потоков тепла начинает интенсивно реагировать в зоне более высоких температур, которая расположена у пода топки. Однако образовавшаяся аэродинамика факела с мощным вихревым потоком внизу топки способствует выбросу инерционных коксовых частиц в шлаковую пленку. Из рис. 7 видно, что коэффициент осаждения имеет тенденцию к увеличению от 25% до 29%. При умеренных значениях вертикального угла оси горелок (-10° , -15°) частицы, оказавшись у пода топки, выгорают полностью. Аэродинамика потока в нижней части топки формируется таким образом, что золовые частицы осаждаются на под топки под горелками. Эти данные подтверждают обоснованность конструкторского решения об изменении угла подачи аэро-

вание для сбивания шлаковых отложений не предусматривает таких соединений и «наплывлений» на стенах котла. Это приводит к использованию нестандартного оборудования и соответственно к удорожанию самой эксплуатации котельного оборудования.

На основе параметрических расчетов было установлено, что более полное выгорание топлива по сравнению с базовым вариантом (че-

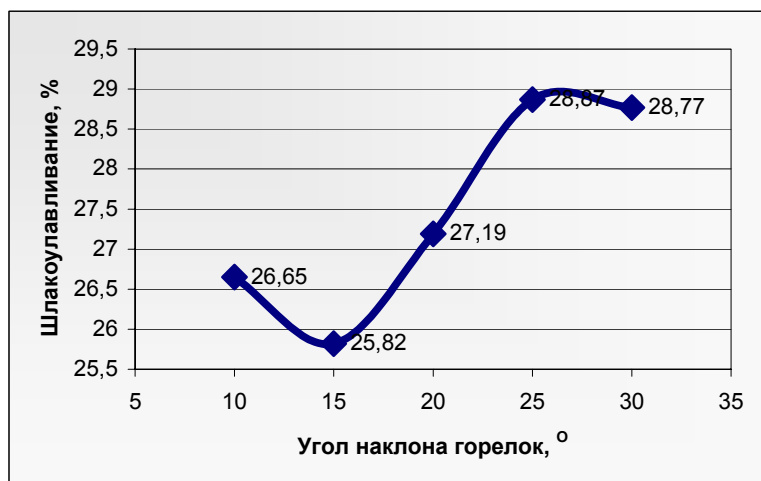


Рис. 7. Осаждение золовых остатков на стенке (%) в топке котла БКЗ-220-100ЖШ при различных углах наклона горелок к горизонту.

70%, R200 = 25%. Расчеты показали, что на выходе из топки повышаются концентрации угарного газа, молекулярного кислорода и температура. Для грубодисперсных частиц ухудшается их рассеивание в горелочных струях, зона горения смещается ближе к тыльной стенке топки. Из-за более низких температур и поэтому меньшей оплавленности эти частицы плохо оседают на боковые стенки топки, но в то же время из-за большей инерционности и меньшей скорости витания лучше сепарируются на под топки. Возможность управляющего воздействия на шлакоулавливание по расчетам в данном случае оценивается от 23% до 31% (рис. 8).

Установка дополнительного пережима на тыльной стенке оказывает нетривиальное влияние на шлакоулавливание. Увеличение глубины пережима не дает однозначной зависимости для характеристики осаждения частиц.

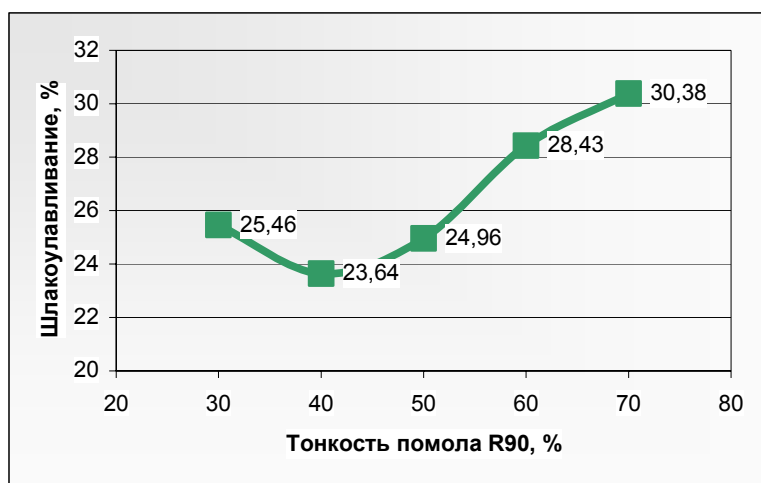


Рис. 8. Осаждение золовых остатков в топке котла БКЗ-220-100ЖШ при различном дисперсном составе топлива.

смеси с -30° до -15° для устранения металлизации пода топки, принятого ранее по результатам натурных исследований котла.

Исследование влияния тонкости помола угля на характеристики топочных процессов проводились для следующих значений тонины помола: R90 = 30%, R200 = 5%; R90 = 40%, R200 = 10%; R90 = 50%, R200 = 15%; R90 = 60%, R200 = 20% и R90 =

70%, R200 = 25%. Это связано со сложной аэродинамикой, формирующейся вблизи пережима при различных его размерах. Во-первых, дополнительный пережим разбивает горелочные струи на два потока, один из которых уходит над пережимом, другой в нижнюю часть топки. При увеличении глубины пережима над ним до аэродинамического выступа отчетливо проявляется обширная рецир-



Рис. 9. Осаждение золовых остатков в топке котла БКЗ-220-100ЖШ при различной глубине пережима на тыльной стороне

куляционная зона, осаждение частиц на стенки камеры сгорания уменьшается (рис. 9), зона повышенных температур (зона горения) смещается к низу топки, наблюдается рост скорости газодисперсного потока над подом топки. Установка дополнительного пережима уменьшает общий объем зоны реагирования горючей смеси, но увеличивает теплообменную поверхность, и при меняющейся

аэродинамической картине это приводит лишь к незначительному уменьшению температуры на выходе из топки.

В пятой главе описан программный пакет для расчета котлоагрегатов. В настоящее время основное направление деятельности ведущих фирм — производителей программного обеспечения для компьютеров на базе PC тесно связано с разработкой приложений под Windows. Общая черта их дальнейшего развития — отказ от поддержки DOS приложений. В связи с этим представляется актуальным перевод активно используемых программ, разработанных на платформе DOS, под платформу Win32. На этой платформе имеются встроенные драйверы для программирования трехмерной графики, создания многопоточных программ, которые полностью используют ресурсы многопроцессорных систем, а также встроенные драйверы для обмена данными по сети, например, при распределенных вычислениях с использованием нескольких машин. Результаты этой деятельности имеют большое прикладное значение при проведении массовых вычислений, в том числе и при расчете топков котельных агрегатов, так как ускоряют процесс получения результата в несколько раз в зависимости от используемых ресурсов.

В течении нескольких лет проводится работа по переводу созданного в среде DOS для расчета пространственных аэротермохимических топочных процессов пакета CHAIF³ под новую операционную систему с дальнейшим развитием математического обеспечения. Разработанный программный комплекс получил название Fire 3D и состоит из четырех приложений для стадийной обработки данных: Mesh Converter — для импорта расчетных сеток трехмерных геометрий из текстового формата, Flow Searcher — для расчета

³ Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Пакет прикладных программ CHAIF для численного исследования аэродинамики и теплообмена внутренних течений. Томск. Изд-во ТГУ. 1991. 8с.

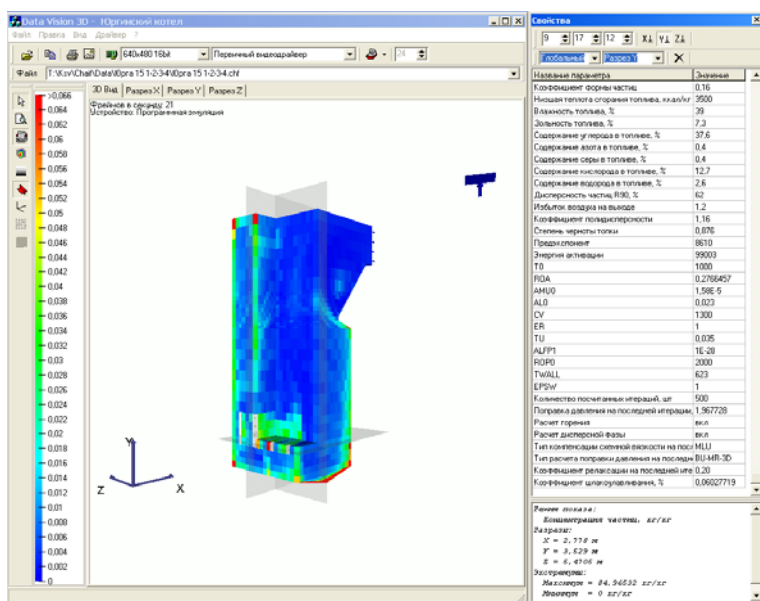


Рис. 10. Окно визуализации турбулентных течений Data Vision

турбулентных течений и теплообмена с возможностью применения лагранжева подхода для описания горения и движения частиц угля с точки зрения оценки шлакоулавливания, Data Vision – для визуализации конечного результата вычислений (рис. 10) и Report Converter для конвертации и последующего анализа в Excel результатов прохождения расчетов.

Выводы

1. Построена математическая модель для исследования пространственной аэродинамики, тепломассообмена, горения и шлакования при факельном сжигании полидисперсного пылеугольного топлива в топках паровых котлов. Для численного решения задачи применен метод конечных разностей со вторым порядком аппроксимации дифференциальных уравнений. Проведены специальные исследования по выбору метода решения разностных уравнений. Значительное (до 50%) сокращение расчетного времени достигается при использовании метода минимальных невязок или метода бисопряженных градиентов с предобуславливанием по Н.И. Булееву.
2. Тестовые расчеты, выполненные с использованием разработанной численной модели для гидромоделей и натуральных пылеугольных топок (БКЗ-220-100ЖШ, БКЗ-210-140Ф), показали хорошее воспроизведение результатов экспериментальных исследований.
3. Проведенные вычислительные эксперименты по расчету топочных процессов в топке парового котла с жидким шлакоудалением БКЗ-220-100ЖШ подтвердили правильность принятого конструкторского решения по уменьшению угла наклона горелочных струй с 30° до 15° , следствием которого стало существенное снижение сепарации коксовых частиц в шлаковую пленку с последующей металлизацией пода топки.
4. Анализ влияния условий подачи топливо-воздушной смеси, дисперсного состава и геометрии топочной камеры котла БКЗ-220-100-ЖШ показал возможность изменения коэффициента шлакоулавливания от 12% до 66%. Определено, что чем меньше дисперсная фаза встречает на своем пути полета препятствий и вихрей, и тоньше помол топлива, тем меньше коэффициент шлакоулавливания, больше коэффициент уноса и, соответственно, больше загрязнений поверхностей нагрева за пределами зоны футерованных экранов.

5. На основании вычислительных экспериментов можно сделать вывод о возможностях управляющего воздействия на поведение топливовоздушной смеси и распределение минеральной части между шлаком и уносом при помощи конструктивно-наладочных факторов. Так, при перенаправлении топлива в разные горелки шлакоулавливание изменяется от 22% до 66%, при изменении угла наклона горелок – от 25% до 29%, тонкости помола от 23% до 31% и установке дополнительного пережима от 12% до 26%.
6. На основе использованной вычислительной модели создан пакет прикладных программ FIRE 3D, ориентированный на персональные компьютеры, с дружественным пользовательским интерфейсом, удобной визуализацией пространственных полей параметров топочных процессов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Заворин А.С., Старченко А.В., Красильников С.В., Коноплев С.И. Оценка степени шлакоулавливания пылеугольных топков // Сопряженные задачи механики и экологии: Материалы международной конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998, с. 109-110.

2. Есаулов А.О., Красильников С.В., Сайкина Л.Г., Старченко А.В. Численное моделирование аэродинамики в топочных камерах парогенераторов // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с. 104-105.

3. Красильников С.В. Численное моделирование аэродинамики, горения и степени шлакоулавливания в пылеугольных топках // Современные техника и технологии: Труды V областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с. 80-82.

4. Красильников С.В., Есаулов А.О., Старченко А.В. К расчету вихревых течений в камерах сгорания котлоагрегатов // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции, Том 1. – Томск, ИПФ ТПУ, 2000, с. 93-96.

5. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: СибВТИ, 2000, с. 369-371.

6. Старченко А.В., Есаулов А.О., Красильников С.В. К расчету турбулентных течений в топочных камерах // Вычислительная газодинамика и горение конденсированных систем: Сб. научных тр. – Томск: Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2001. с. 193 – 202.

7. Старченко А.В., Красильников С.В. Математическое моделирование горения полидисперсных пылеугольных топлив // Известия Томского политехнического университета, 2002, том 305, вып. 2, с. 54-60.

8. Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания // Известия Томского политехнического университета, 2002, том 305, вып. 2, с. 152-157.

9. Starchenko A.V., Krasilnikov S.V., A Numerical Investigation of Particle Deposition in Pulverized Coal-Fired Furnaces // Proceedings of the 10th Workshop on Two-Phase Flow Predictions. Merseburg, April 9-12, 2002. – P. 237-246.

10. Старченко А.В., Красильников С.В., Иванова Н.В. Численное исследование топочных процессов при сжигании пылеугольного топлива // Тезисы докладов XXVI Сибирского теплофизического семинара. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2002, с. 225-226.

Подписано к печати __. __. 2003.

Формат 60×84/16.

Бумага офсетная.

Плоская печать.

Усл. печ. л. ____.

Уч.–изд. л. ____.

Тираж 65 экз.

Заказ № ____.

Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.08.94.

Типография, 634034, Томск, пр. Ленина, 30