

УДК: 662.6; 661.68

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
В ВИХРЕВОМ ТОПОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ****А.В. Старченко³, В.В. Саломатов¹, А.В. Гиль², В.А. Синицын¹,
Л.И. Мальцев¹, С.В. Сыродой²**¹Институт теплофизики СОРАН, Новосибирск, Россия, vvs@nsc.itp.ru²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия**Аннотация**

Создана математическая модель для расчета аэродинамики и теплообмена при сжигании водоугольного топлива (ВУТ) в топочном устройстве вихревого типа. Выполнено численное исследование процесса горения. Проведен анализ влияния соотношения расходов первичного и вторичного воздуха и положения горелочных устройств на аэродинамику, тепломассообмен и концентрационные поля частиц ВУТ и компонент газовой смеси.

Ключевые слова: топка, тепломассообмен, газ, смеси, моделирование

Введение

В настоящее время в энергетике переход на угольное топливо требует применения инновационных угольных технологий – энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологообеспечивающих. Одним из путей масштабного вовлечения угля в производство тепла и электроэнергии может стать использование технологии водоугольного топлива (ВУТ). По сравнению с применяемыми до сих пор подходами по сжиганию ВУТ в кипящем стационарном слое, в циклонном предтопке, плотном слое и др. предлагаемый подход предполагает сжигание полученного ВУТ в высокоинтенсивном турбулентном вихревом потоке. Главным достоинством вихревого сжигания топлива является возможность создания устойчивого сильно турбулизированного закрученного потока в камере и использование этого потока для обеспечения относительного движения воздуха (окислителя) и топливной частицы (горючего). Однако достаточно большое количество воды, забалластированность топлива минеральными включениями и сравнительно невысокая низшая теплота сгорания (12–17 МДж/кг) требуют рациональной организации процесса сжигания для надежного воспламенения и устойчивого горения ВУТ.

Использование математического моделирования позволяет решить ряд проблем, возникающих при сжигании ВУТ в топочной

камере, в частности, в данной статье – это выбор оптимального соотношения «топливо-окислитель» и геометрии топочного устройства, обеспечивающих эффективность его работы.

1. Математическая модель

В данной работе для моделирования аэродинамики, горения и теплообмена в топке используется метод, совмещающий эйлеров и лагранжевы подходы для описания течения газодисперсного потока. Согласно этому методу общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе представляются на основе эйлерова способа описания, т.е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентрации газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Лагранжев подход применяется для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц ВУТ и золотого остатка вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду. В этом случае общая математическая модель исследования процесса включает следующие компоненты.

1.1. Модель турбулентного реагирующего газового потока

Эта компонента общей математической модели содержит записанные для газовой смеси уравнение неразрывности, уравнения баланса массы газовых компонент, уравнения

движения, уравнение энергии и уравнение состояния [1]:

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial \rho C_{H_2O}}{\partial t} + \frac{\partial \rho C_{H_2O} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x_i} \right) + J_{evap}; \quad (6)$$

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

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

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

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

здесь U_i – компоненты вектора скорости газа;
 T, p – температура и давление;
 ρ, α_g – приведенная плотность и объемная доля газовой фазы;

$J_{evap}, J_{vap}, J_{char}$ – скорость испарения влаги, выхода летучих и горения коксового остатка;

C_k – концентрация составляющей газовой фазы ($k = O_2, vol, CO, CO_2, N_2, H_2O$);

μ, μ_t – молекулярная и турбулентная вязкость газа;

k – кинетическая энергия турбулентности;

F_j, Θ – компоненты силы и теплообмен межфазного взаимодействия (газ-частицы);

$J_{vol}, J_{CO}, Q_{vol}, Q_{CO}$ – интенсивность и тепловой эффект газофазного горения летучих веществ и монооксида углерода.

В уравнениях (1-10) учитываются потоки массы, импульса и энергии за счет испарения влаги из частиц, выхода летучих, догорания коксового остатка, динамического и теплового скольжения фаз и т.п.

Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «к-ε» модели турбулентности с учетом влияния движущихся частиц на турбулентную структуру потока.

Радиационный теплообмен в двухфазном потоке рассматривается в рамках Р1 приближения метода сферических гармоник [2], неплохо зарекомендовавшего себя для расчета топочных процессов [1].

1.2. Дисперсная фаза

Для моделирования движения частиц используется лагранжев подход. Весь спектр частиц ВУТ, поступающих в топочную камеру, разбивается на ряд фракций. При этом счи-

тается, что поведение каждой фракции частиц может быть охарактеризовано поведением ее представителя – пробной одиночной частицы-маркера, далее для краткости частицы.

Уравнения движения частицы i -ой фракции имеют вид

$$\frac{dU_j^i}{dt} = \frac{U_j - U_j^i}{\tau_i} + g_j; \quad j = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Здесь

$$\tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3C_{Di}\rho |\vec{U}^i - \vec{U}|},$$

τ_i – время релаксации при скольжении частицы в несущей среде;

$\vec{U}^i, \vec{U}$ – соответственно скорость частицы и газа,

U_j^i – компоненты скорости частицы;

U_j – компоненты скорости газа;

g_j – проекции ускорения свободного падения на декартовы оси;

ρ_p, ρ – плотность частиц и газа, соответственно;

d_i – размер частицы i -ой фракции;

C_{Di} – коэффициент сопротивления частиц, зависящий от числа Рейнольдса Re_i , которое рассчитывается по скорости скольжения фаз.

Уравнения горения и тепломассообмена для i -ой частицы [3]:

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

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

Здесь $\dot{M}_i^{evap}, \dot{M}_i^{vap}, \dot{M}_i^{char}$ – массовые скорости испарения влаги из частицы, выхода летучих веществ и горения коксового остатка, соответственно; m_i – масса частицы;

c_p – теплоемкость частицы;

Q_{char} – калорийность кокса;

Q_{vap} – тепло, необходимое для выхода летучих;

L_{vap} – скрытая теплота парообразования;

ε_p – степень черноты частицы;

T_i – температура i -ой частицы,

H – плотность падающего на частицу излучения;

α_{conv} – коэффициент конвективной теплоотдачи частицы, определяемый из соотношения

$$\alpha_{conv} = \frac{\lambda}{d_i} (2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}); \quad (14)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа;
Pr – число Прандтля.

При вычислении массовой скорости испарения используется соотношение, в котором учитывается диффузия водяных паров с поверхности частицы в газовую смесь и обратно,

$$\dot{M}_i^{evap} = \pi d_i^2 k_c \left((\rho C_{H_2O})_{surf} - (\rho C_{H_2O}) \right), \quad (15)$$

где

$$k_c = \frac{D_{H_2O}}{d_i} (2 + 0,6 \text{Re}_i^{0,5} \text{Sc}^{0,33}) \quad (16)$$

k_c – коэффициент массопереноса;

D_{H_2O} – коэффициент диффузии пара;

Sc – Число Шмидта;

$(\rho C_{H_2O})_{surf}$, ρC_{H_2O} – массовая концентрация водяного пара на поверхности частицы

и вдали от неё, соответственно.

При определении массовой скорости выхода летучих веществ $\dot{M}_i^{vap}$ используется закон Аррениуса

$$\dot{M}_i^{vap} = k_{vap} \exp\left(-\frac{E_{vap}}{R_0 T_i}\right) \cdot f_{vo} \cdot m_{oi}, \quad (17)$$

где m_{oi} – начальная масса сухой частицы диаметром d_i , f_{vo} – массовая доля летучих веществ в сухом угле;

k_{vap} – предэкспонент;

E_{vap} – энергия активации.

Скорость горения коксового остатка $\dot{M}_i^{char}$ зависит от кинетической скорости химической реакции горения углерода и от интенсивности диффузии окислителя к поверхности частицы,

$$\dot{M}_i^{char} = \pi d_i^2 \rho C_{O_2} \frac{K_K K_D}{K_K + K_D}, \quad (18)$$

где ρC_{O_2} – массовая концентрация кислорода в газовой смеси;

$$K_K = k_{char} \exp\left(-\frac{E_{char}}{R_0 T_i}\right), \quad (19)$$

$$K_D = \frac{D_{O_2}}{d_i} (2,0 + 0,16 \text{Re}_i^{0,667}); \quad (20)$$

$$D_{O_2} = 16 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,9}, \quad (21)$$

D_{O_2} – коэффициент диффузии кислорода к поверхности угольной частицы.

Образование шлаковой пленки на стенке моделируется следующим образом. Если температура частицы больше температуры налипания [4], то частица остается на стенке.

Если температура частицы меньше температуры налипания и на поверхности топки присутствует шлаковая пленка (были предшествующие осаждения частиц), то частица также оседает на стенке. В противном случае произойдет отскок частицы от стенки.

1.3. Влияние дисперсной фазы на газовую фазу

Для численного решения системы определяющих уравнений использовался метод контрольного объема [5]. При последовательном расчете траекторий движения частиц-маркеров с учетом изменения их массы, скорости, положения и температуры для каждого контрольного объема вычисляются значения источников членов в уравнениях переноса, которые описывают влияние частиц на характеристики несущей среды: скорость испарения влаги J_{evap} , выход летучих J_{vap} и горение коксового остатка J_{char} , силу, действующую на частицу F_j , дивергенцию теплового потока между фазами Θ . Эти характеристики рассчитывались по следующим формулам:

$$J_{\text{evap}} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{\text{evap}}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}; \quad (22)$$

$$J_{\text{vap}} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{\text{vap}}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}; \quad (23)$$

$$J_{\text{char}} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{\text{char}}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}; \quad (24)$$

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \gamma_i (U_j^i - U_j) \dot{m}_{oi} t_i; \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Theta = & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[Q_{\text{char}} \Delta m_i^{\text{char}} + \bar{m}_i c_p \Delta T_i - Q_{\text{vap}} \Delta m_i^{\text{vap}} - L_{\text{vap}} \Delta m_i^{\text{evap}} \right] \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} - \\ & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[c_p T_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 \right] \dot{m}_{oi} + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_{oi} t_i}{\tau_i} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 + \\ & + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\pi d_{pi}^2}{m_{oi}} \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] \dot{m}_{oi} t_i; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho_p V} \sum_{i=1}^N \dot{m}_{oi} t_i.$$

Здесь N – число частиц-представителей, прошедших через рассматриваемый контрольный объем, имеющий размер V ;

$\Delta m_i = \Delta m_i^{\text{evap}} + \Delta m_i^{\text{vap}} + \Delta m_i^{\text{char}}$ – изменение массы i -ой частицы в процессе испарения влаги, выхода летучих и горения коксового остатка за время прохождения ею данного контрольного объема;

m_{oi} – начальная масса частицы – представителя;

$\dot{m}_{oi}$ и $\dot{m}_{oi}$ – 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 .

2. Метод расчета

Поставленная математическая задача реализуется численно с использованием шах-

матных неравномерных сеток и применением неявных разностных схем. Трехмерные уравнения переноса аппроксимируются со вторым порядком точности.

Дискретные аналоги уравнений движения решаются методом Зейделя с нижней релаксацией.

Разностные уравнения переноса для скалярных характеристик интегрируются итерационно-вариационным методом Bi-CGSTAB [6] с предварительным обуславливанием по Булееву [7].

Поле давления рассчитывается по алгоритму SIMPLE Патанкара [5].

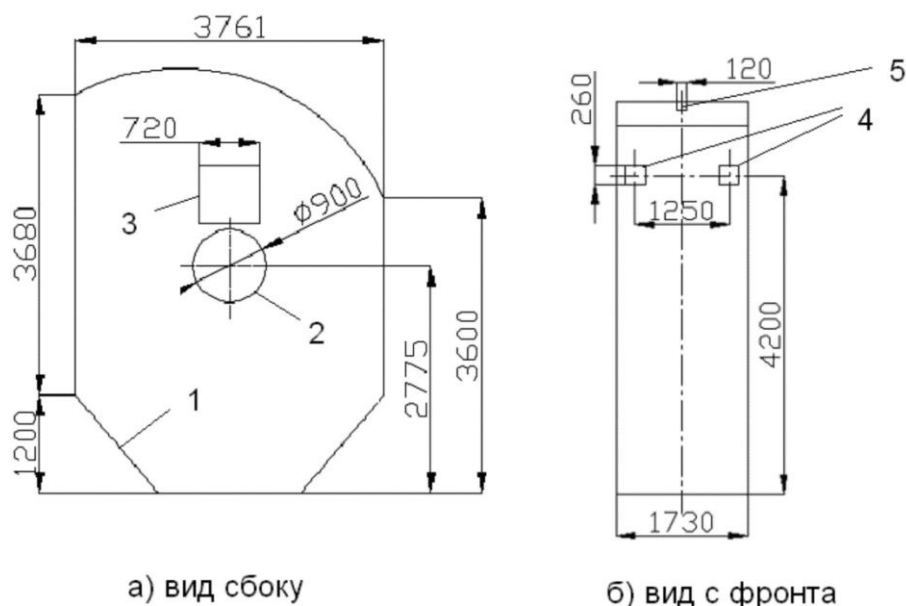
Параметры частиц (координаты положения, компоненты вектора скорости, температура, масса) определяются с помощью интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений с замороженными коэффициентами при неизвестных.

В силу нелинейности определяющих уравнений осуществляются глобальные итерации с нижней релаксацией.

3. Результаты расчета

Для математического моделирования сжигания ВУТ использовалась физическая мо-

дель топочного устройства, разработанного ООО «Теплопром» и ИТ СО РАН, схема которого представлена на рис.1 а и б [8, 9].



- 1- холодная воронка, 2- вставка,
3 - газовыпускное окно, 4 - амбразуры горелок,
5 - сопло вторичного дутья.

Рис. 1 – Схема топочной камеры

Нижняя часть топки выполнена в виде холодной воронки 1, а в центральной части установлена цилиндрическая вставка 2, над которой расположены газовыпускные окна 3. Амбразуры горелок 4, имеющие квадратные сечения, расположены на фронтальной стене (рис. 1 б). На потолке, ограничивающем топочный объем, установлено сопло вторичного дутья 5 в продольной срединной плоскости.

В качестве сжигаемого топлива было принято ВУТ, приготовленное из кузнецкого

каменного угля марки Д путем добавления воды в количестве 40 % от общей массы твердой фракции. Характеристики кузнецкого угля представлены в табл. 1, а характеристики ВУТ на основе этого угля – в табл. 2.

В расчете для ВУТ принималось приближение монодисперсной среды с диаметром частиц 60 мкм. Однако следует отметить, что предлагаемая математическая модель позволяет рассчитывать горение и многофракционного топлива.

Таблица 1 – Характеристики кузнецкого угля марки Д

$A^r, \%$	$W^r, \%$	$C^r, \%$	$H^r, \%$	$N^r, \%$	$S^r, \%$	$O^r, \%$	$Q^r, \text{ ккал/кг}$
13,2	12,0	58,7	4,2	1,9	0,3	9,7	5454,4

Таблица 2 – Характеристика ВУТ

$A^r, \%$	$W^r, \%$	$C^r, \%$	$H^r, \%$	$N^r, \%$	$S^r, \%$	$O^r, \%$	$Q^r, \text{ ккал/кг}$
7,92	47,2	35,2,7	2,52	1,14	0,18	5,82	3033,0

Влияние соотношения расходов первичного и вторичного воздуха.

Для выяснения влияния соотношения расходов первичного и вторичного воздуха на процесс горения были проведены расчеты по

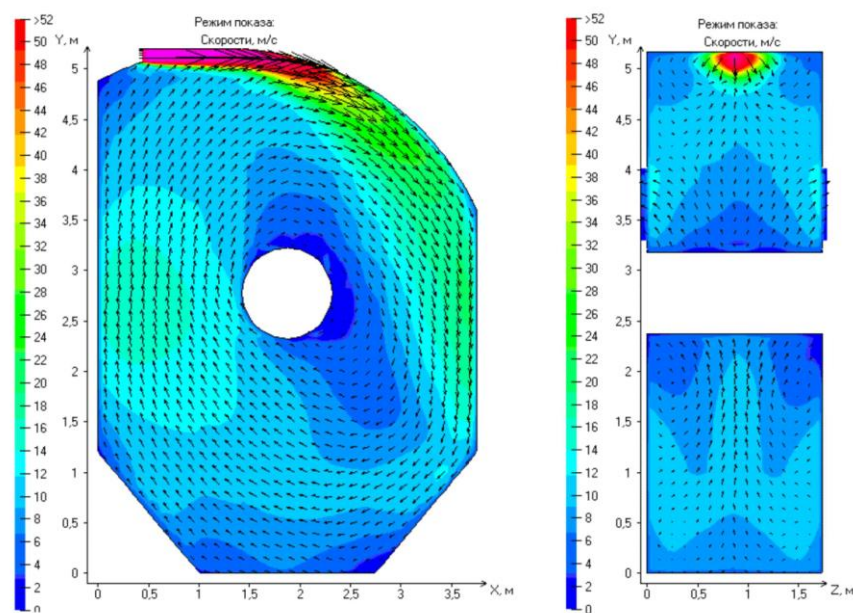
двум вариантам исходных данных, представленным в табл. 3. Во втором варианте расход воздуха через основные горелочные устройства увеличен в 2,5 раза, а объем вторичного воздуха уменьшен почти в 1,3 раза.

Таблица 3 – Технические параметры сжигания ВУТ

Параметры	Расход ВУТ	Расход первичного воздуха	Расход вторичного воздуха	Температура первичного/вторичного воздуха	Коэффициент избытка воздуха	Скорость подачи ВУТ	Скорость вторичного воздуха
Вариант 1	1,5 т/ч	650 м ³ /ч	5830 м ³ /ч	25/25 °С	1,2	1,46 м/с	112,5 м/с
Вариант 2	1,5 т/ч	1300 м ³ /ч	4530 м ³ /ч	25/25 °С	1,0	1,46 м/с	90 м/с

На рис. 2 представлены результаты расчета поля скорости в топке в различных вертикальных сечениях по варианту 1 исходных данных. Прежде всего, необходимо отметить закручивание потока вокруг центральной вставки. Видно, что наличие сопла вторичного

воздуха с малым выходным сечением и большими объемами пропускаемого воздуха в центральной части топки (рис. 2а) приводит к существенным изменениям аэродинамической структуры течения в объеме топочной камеры.



а) по продольной оси; б) по поперечной оси

Рис. 2 – Аэродинамическая структура потоков в вертикальных сечениях топки в первом варианте

По ширине топки наблюдается вихревое движение среды рис. 2б. Результаты расчета показывают, что в верхней части вихревое движение среды формируется в углах топки при прохождении восходящего потока между горелочными устройствами, который ударяясь

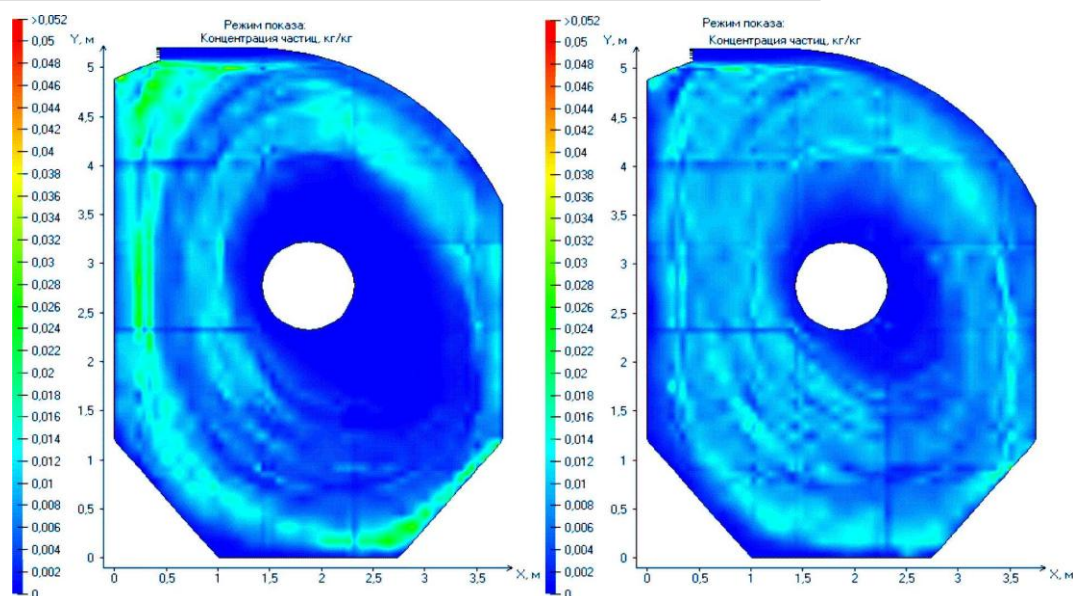
о потолок, направляется к левой и правой стенкам. Далее потоки вдоль стен движутся вниз до горелок, после чего вновь увлекаются восходящим межгорелочным потоком. Вихревые потоки, формирующиеся ниже цилиндри-

ческой вставки, обусловлены влиянием высокоскоростной струи вторичного воздуха.

Результаты расчета по второму варианту исходных данных показывают, что при увеличении расхода воздуха в основные горелочные устройства в 2 раза и соответствующем снижении подачи вторичного дутья в аэродинамической структуре потоков существенных изменений не происходит.

На рис. 3 представлены поля концентрации частиц в объеме топki. Видно, что основная масса частиц, увлекаемых газозвушным потоком, закручивается вокруг центрального

тела. В центральной части топki наблюдается минимальная концентрация частиц. Сравнение рис. 3а и рис. 3б показывает, что уменьшение вторичного дутья (вариант 2) приводит к более равномерному распределению частиц в объеме топki за счет снижения центробежных сил, действующих на поток частиц. Результаты расчета показывают, что по ширине топki частицы концентрируются согласно аэродинамической структуре потоков, в результате основная доля твердой фракции движется вдоль стен, это приводит к выносу значительной части недогоревшего топлива (до 15%) из топki.



а) в первом варианте б) во втором варианте расчета

Рис. 3 – Концентрация частиц в вертикальных сечениях по продольной оси

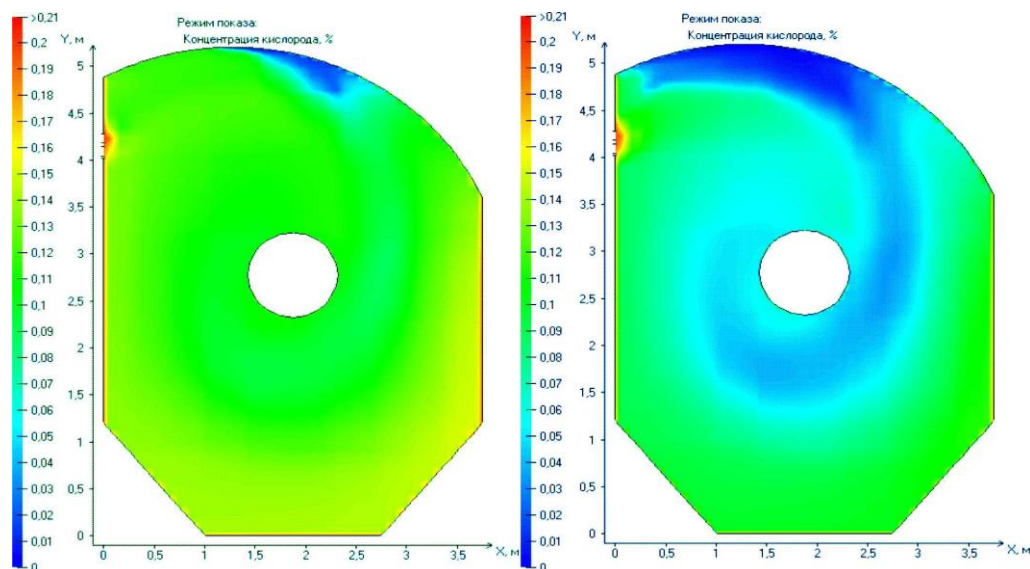
Результаты расчета распределения концентрации водяных паров показывают их полную корреляцию с распределением твердой фазы. Это отмечается и в распределениях окиси углерода.

На рис. 4 представлены результаты расчета распределения концентрации кислорода для первого и второго варианта исходных данных. Как известно, концентрация кислорода является показателем интенсивности процесса горения. Из сравнения рис. 4а и рис. 4б видно, что область выгорания кислорода в значительной мере зависит от расхода воздуха через горелки.

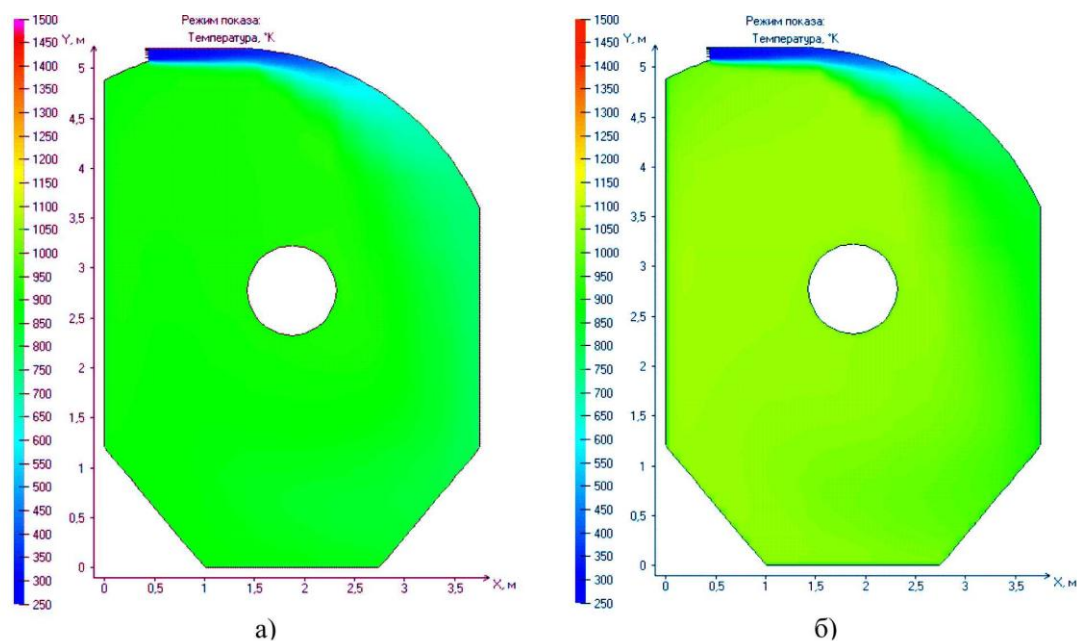
На рис. 4б для второго варианта исходных данных (повышенный расход воздуха

через горелки), область выгорания заметно больше. Отмеченный эффект объясняется интенсификацией подвода окислителя к поверхности частиц топлива в струе горелки.

На рис. 5 представлены распределения температуры для двух вариантов расчета. Видно, что с уменьшением расхода вторичного воздуха средний уровень температуры в топке растет. Это связано с более равномерным распределением частиц топлива (рис. 3). Однако, в общем, необходимо заметить, что температурный уровень в топке сравнительно невысокий вследствие недостаточно интенсивного горения и в среднем по объему топki составляет около 1000 К.



а) в первом варианте расчета; б) во втором варианте расчета

Рис. 4 – Концентрация O_2 в вертикальных сечениях по оси горелочного устройства

а) первый вариант; б) второй вариант расчета

Рис. 5 – Распределение температуры в вертикальных сечениях по продольной оси

Влияние расположения горелочных устройств.

Чтобы выяснить, как влияет положение горелок на фронтальной стене топки, уменьшалась высота их местоположения до отметки 3355 мм (третий вариант расчета) и расстояние между осями горелок до 850 мм (четвертый вариант) (см. рис. 1).

Анализируя результаты расчета при снижении высоты расположения горелочных устройств (третий вариант), можно отметить, что наблюдается смещение горелочных струй к потолку муфеля под воздействием горизонтального вихревого потока и формирование над горелками зоны замедленного течения у фронтальной стены.

Расчеты показали, что вариация положения горелочных устройств в указанных выше пределах для рассмотренного топочного устройства слабо влияет на протекание топочных процессов.

В работе [10] были проведены расчеты сжигания ВУТ в топочной камере аналогичной геометрии. Топливо моделировалось полидисперсной смесью частиц с заданным распределением по размерам. После подсыхания в топочной камере частицы ВУТ распадалась на мелкие фрагменты и догорали по модели горения частиц угля. Сравнение результатов расчета работы [10] с результатами настоящей работы показало, что наличие частиц мелких фракций в топливной смеси [10] приводит к более однородному распределению частиц по объему топочной камеры и, как следствие, к повышению температуры горения. Поэтому нам представляется, что модель распадающихся частиц ВУТ целесообразно использовать при сжигании бурых углей с выделением большого количества летучих, которые способствуют распаду частиц. В отличие от этого расчет горения ВУТ с использованием монофракций, выполненный в настоящей работе, следует применять для углей с малым содержанием летучих. Хотя разработанный нами компьютерный код успешно справляется и с полидисперсным потоком частиц ВУТ.

Заключение

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы.

Во всех исследованных вариантах наблюдается аналогичная или близкая аэродинамическая картина, что свидетельствует о существенном влиянии скорости потока, истекающего из верхнего сопла. Для изменения аэродинамической структуры потоков необходимы перераспределения воздуха в больших объемах между основными горелочными устройствами и соплом или увеличение сечения воздушного сопла.

Изменение скоростей подачи первичного и вторичного воздуха возможны в широких пределах, поскольку скорость на выходе из воздушного сопла остается достаточно большой для стабильного вихревого движения.

Выгорание топлива во всех вариантах происходит при невысоких температурах и повышенной концентрации кислорода. Для полноты выгорания кислорода, топливных

частиц и повышения температуры необходимо увеличить время витания частиц в объеме муфеля и при этом сохранить заполнение всего объема топливными частицами.

Работа выполнена частично по программе ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России».

Литература

1. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. Изд-во Том. ун-та, 1998.
2. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен. – М.: Мир, 1976. – 616 с.
3. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо : монография. – Томск : STT, 2011. – 184 с.
4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 208 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Van der Vorst H.A. Bi-CGSTAB: a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems: Preprint 633. – Univ. Utrecht. – 1990.
7. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. – М.: Наука, 1995. – 288 с.
8. Патент РФ на полезную модель № 88101. «Устройство для сжигания водоугольного топлива». Патентообладатель: ООО «ТеплоПром». Авторы: Алексеенко С.В., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Мальцев Л.И., Самборский В.Е., Саломатов В.В. Зарегистрировано 27.10.2009.
9. Патент РФ № 2389948. Устройство для сжигания водоугольного топлива. Патентообладатель: ООО «ТеплоПром», г. Новосибирск. Авторы: Алексеенко С.В., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Мальцев Л.И., Самборский В.Е., Саломатов В.В. Опубликовано: 20.05.2010 Бюл. № 14.
10. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Мальцев Л.И., Тепфер Е.С. Моделирование сжигания ВУТ в топочной камере/ VII Всероссийская конференция с международным уча-

стием «Горение твердого топлива», 10-13 ноября 2009г., Новосибирск, Ч.1, стр. 227-233.

Дата поступления 14 февраля 2012 г.

MATHEMATICAL MODELING OF COMBUSTION OF WATER-COAL FUEL IN VORTEX FURNACE

A.V. Starchenko³, V.V. Salomatov¹, A.V. Gil², V.A. Sinitsyn¹,
L.I. Maltsev¹, and S.V. Syrodoy²

¹Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia, vvs@nsc.itp.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

The mathematical model for calculation of aerodynamics and heat transfer at combustion of water-coal fuel (WCF) in a vortex type furnace was developed. The combustion process was studied numerically. The effect of ratio between the flow rates of primary and secondary air and furnace position on aerodynamics, heat and mass transfer, and concentration fields of WCF particles and gas mixture components was analyzed.

ҚҰЙЫНДЫ ТИПТІ ЖАНДЫРҒЫДА СУ АРАЛАС КӨМІР ОТЫН ЖАНУЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

А.В. Старченко³, В.В. Саломатов¹, А.В. Гиль², В.А. Синицын¹,
Л.И. Мальцев¹, С.В. Сыродой²

¹Жылу физика институты, Новосибирск, Ресей, vvs@nsc.itp.ru

²Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

³Ұлттық зерттеу Томск мемлекеттік университеті, Томск, Ресей

Аннотация

Құйынды типті жандырғыда су аралас көмір отын жануының аэродинамика және жылу есептеу математикалық моделі жасалды. Жану процесінің сандық тергеу-лық. Жану процесінің сандық зерттеуі жүргізілді. Бастапқы, екіншілік ауаның шығындардының және құрылғының орналасуының аэродинамикаға, жылу және масса мен су аралас көмірдің концентрациясы және газ қоспасының бөлшектеріне әсері зерттелді.