

УДК 532.529: 517.4

Б.Б.Рохман, докт.техн.наук (Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев)

Об организации наиболее эффективного режима сжигания смеси отсева АШ и шламов в котлоагрегате с циркулирующим кипящим слоем блока №4 Старобешевской ТЭС.

2. Моделирование и теоретические исследования движения и физико-химических процессов в надслоевом пространстве

Построена стационарная модель, описывающая восходящее движение, теплообмен и химическое реагирование полидисперсного ансамбля коксозольных частиц в ядре потока с переменным расходом примеси по высоте надслоевого пространства (НП). Проведены широкие теоретические исследования рабочего процесса в НП топки котла с циркулирующим кипящим слоем, результаты которых были сопоставлены с экспериментом и данными, приведенными в [1]. Показано, что на начальном участке НП температура крупных фракций может превышать температуру 900°С, которую считают предельно допустимой по условию связывания окислов серы. Однако это практически не отразится на процессе улавливания SO₂, так как доля крупных фракций в газодисперсном потоке мала.

Ключевые слова: горение, частица, газ, аэродинамика, температура, концентрация.

Побудовано стаціонарну модель, що описує висхідний рух, теплообмін та хімічне реагування полідисперсного ансамблю коксозольних частинок у ядрі потоку зі змінною витратою домішки по висоті надшарового простору (НП). Проведені широкі теоретичні дослідження робочого процесу в НП топки котла з циркулюючим киплячим шаром, результати яких були зіставлені з експериментом та даними, наведеними в [1]. Показано, що на початковій ділянці НП температура великих фракцій може перевищувати температуру 900°С, яку вважають гранично допустимою за умовою зв'язування оксидів сірки. Однак це практично не позначиться на процесі уловлювання SO₂, тому що частка великих фракцій у газодисперсному потоці мала.

Ключові слова: горіння, частинка, газ, аеродинаміка, температура, концентрація.

Обозначения

B	– расход угля (дымовых газов), кг/ч
C	– концентрации газовых компонентов (кмоль/м ³) и углерода
c	– теплоемкость, кДж/(кг·К)
D	– расход пара (кг/ч) или коэффициент диффузии (м ² /с)
E	– энергия активации, кДж/кмоль
f	– сечение, м ²
F	– сила, Н/м ³
g	– ускорение свободного падения, м/с ²
H	– высота, м
k	– константа скорости реакции, м/с
Nu	– критерий Нуссельта
n	– счетная концентрация частиц, шт/м ³
P	– давление газа, Н/м ²
Q	– тепловой эффект реакции (кДж/кмоль) или тепловой поток (кДж/(с·м ³)) или тепловосприятие экранов (кДж/с)
t	– температура, °С
u	– скорость, м/с
z	– аксиальная координата, м
α	– коэффициент массообмена (м/с) или коэффициент теплообмена (кДж/(с·м ² ·К))
β	– истинная объемная концентрация частиц
γ	– постоянная спада экспоненты, 1/м
δ	– диаметр частицы, м
μ	– молекулярная масса, кг/кмоль
ρ	– плотность, кг/м ³
φ	– степень конверсии углеродных частиц
Ω	– толщина КЗ, м
M	– количество фракций

Индексы нижние: a – сила аэродинамического сопротивления частицы; ash – зола; C – углерод; c – ядро потока; CO , CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 – окись и двуокись углерода, водяной пар, двуокись серы, азот и кислород; $C + O_2$, $C + 0,5O_2$, $C + CO_2$ – гетерогенные реакции горения и газификации углерода; $CO + O_2$ – гомогенная реакция горения окиси углерода; cond – кондуктивный теплообмен; conv – конвективный теплообмен; $CO_2 \rightarrow cm$, $O_2 \rightarrow cm$, $CO \rightarrow cm$ – диффузия углекислого газа, кислорода и окиси углерода в газовую смесь; D – диффузия; d – кольцевая зона; e – выход; fb – надслоевое пространство; g – газ; $g \rightarrow \text{экр}$, $j \rightarrow \text{экр}$, $s \rightarrow \text{экр}$, $j \rightarrow g$, $s \rightarrow g$ – лучистый теплообмен между газом и стенкой, частицами кокса фракции j и стенкой, золы фракции s и стенкой, кокса фракции j и газом, золы фракции s и газом; $i = j$, s ; $j = 1 - M_C$; m – среднее значение; max, min – максимальный и минимальный параметры; $s = 1 - M_{ash}$; p – частица; rad – лучистый теплообмен; steam – пар; γ , χ , θ – параметры; экр – экраны; 1–6 – номера фракций; $\langle \rangle$ – осреднение по высоте НП; 0 – начальные условия. Индексы верхние: w – поверхность.

В работе [1] описана полуэмпирическая инженерная методика расчета рабочего процесса сжигания смеси отсева АШ и шламов в котле с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) блока №4 Старобешевской ТЭС, с помощью которой проведен ряд поверочных расчетов парогенератора на нагрузке, близкой к номинальной ($D_{stem} = 652$ т/ч). Цель этих исследований – найти такой режим горения смеси отсева АШ и шламов, при котором температура газодисперсного потока на выходе из топki не превышала бы $900^\circ C$, что является необходимым условием для максимального улавливания окислов серы. При этом обеспечиваются требуемые параметры пара перед цилиндрами высокого и среднего давления согласно паспорту котла.

Отметим, что данная методика базируется в основном на уравнениях материального и теплового (с учетом радиационного, кондуктивного и конвективного теплообмена между газозвесью и поверхностями нагрева) балансов и аналитических выражениях, полученных из дифференциальных уравнений неразрывности газовой фазы, с учетом кинетики реакции $C + O_2 = CO_2$ и переменной концентрации частиц по высоте надслоевого пространства (НП). Так как инженерная оперативная методика расчета построена на основе ряда гипотез и упрощающих предположений, то для проверки принятых допущений целесообразно сопоставить результаты поверочных расчетов котла с ЦКС Старобешевской ТЭС с численными исследованиями, полученными с использованием более сложных дифференциальных моделей. Отсюда вытекает основная цель настоящей работы: а) построить модель восходящего движения, тепломассообмена и горения полидисперсного ансамбля частиц кокса и золы в ядре потока с переменным расходом

примеси по высоте НП топki с ЦКС с учетом лучистого, кондуктивного и конвективного теплообмена между газом и частицами, газодисперсным потоком и экранами НП, гетерогенных и гомогенных реакций, сил тяжести и межфазного взаимодействия; б) с использованием начальных условий на входе в НП для варианта III (из [1]) при помощи разработанной модели получить детальную информацию о процессах переноса и горения твердого топлива в НП топki котла с ЦКС Старобешевской ТЭС и сравнить ее с данными, приведенными в [1].

Математическая модель построена на следующих основных допущениях: 1) процесс стационарный; 2) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенных реакции $C + O_2 = CO_2$, $2C + O_2 = 2CO$, $C + CO_2 = 2CO$ и одну гомогенную – $2CO + O_2 = 2CO_2$; 3) газовая смесь состоит из кислорода, азота, двуокиси и окиси углерода, водяного пара и двуокиси серы; 4) дисперсная фаза включает в себя M_C фракций коксовых и M_{ash} фракций золовых частиц сферической формы; 5) гетерогенное горение протекает на поверхности коксовых частиц, вследствие чего их размер уменьшается; 6) в течение всего времени пребывания в топке частицы сохраняют шарообразную форму; 7) так как сечение нисходящего плотного потока в кольцевой зоне (КЗ) не превышает в среднем 6–7% от поперечного сечения НП и процессы тепломассообмена и горения протекают преимущественно в ядре потока, то в первом приближении будем пренебрегать влиянием пристеночной области; 8) восходящий поток примеси в НП, состоящий из полидисперсного ансамбля частиц кокса и золы, экранирован "дырчатой" стенкой, за которой располагается КЗ и через которую твердая фаза проникает из ядра в КЗ. Рассматривается одно-

сторонний массообмен между реакционной зоной и КЗ; 9) расход рециркулирующих частиц кокса и золы в ядре потока экспоненциально убывает по мере удаления от верхней границы кипящего слоя; 10) между газодисперсным потоком и "дырчатой" стенкой НП происходит кон-

дуктивно-конвективный и лучистый теплообмен.

Система уравнений, описывающая движение, тепломассообмен и горение полидисперсного ансамбля частиц кокса и золы в ядре потока с переменным расходом твердой фазы по высоте НП, имеет вид:

$$\frac{d(u_g C_{O_2})}{dz} = -6 \sum_{j=1}^{M_c} \alpha_{D,\gamma,j} (C_{O_2} - C_{O_2j}^w) \frac{\beta_j}{\delta_{C,j}} - k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO}, \quad (1)$$

$$\frac{d(u_g C_{CO_2})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_c} \alpha_{D,\gamma,j} (C_{CO_2j}^w - C_{CO_2}) \frac{\beta_j}{\delta_{C,j}} + 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO}, \quad (2)$$

$$\frac{d(u_g C_{CO})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_c} \alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) \frac{\beta_j}{\delta_{C,j}} - 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO}, \quad (3)$$

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j})}{dz} = -[\alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) + \alpha_{D,\gamma,j} (C_{CO_2j}^w - C_{CO_2})] \frac{6\mu_c \beta_j}{\delta_{C,j} \rho_{C,j}} - \gamma \beta_j u_{p,j}, \quad (4)$$

$$n_i = \frac{n_{i0} u_{p,i0}}{u_{p,i}} \exp(-\gamma z), \quad \delta_{C,j} = \sqrt[3]{\frac{6\beta_j}{\pi n_j}}, \quad \beta_s = n_s \pi \delta_s^3 / 6, \quad \alpha_{D,\gamma,j} = \frac{D_{O_2 \rightarrow cm} Nu_{D,j}}{\delta_{C,j}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{D,\gamma,j} = \frac{D_{CO_2 \rightarrow cm} Nu_{D,j}}{\delta_{C,j}}, \quad \alpha_{D,\theta,j} = \frac{D_{CO \rightarrow cm} Nu_{D,j}}{\delta_{C,j}},$$

$$\frac{d(\beta_i u_{p,i}^2)}{dz} = \frac{F_{a,i}}{\rho_{p,i}} - g\beta_i - \gamma \beta_i u_{p,i}^2, \quad \frac{d(\rho_g u_g^2)}{dz} = -\frac{dP}{dz} - g\rho_g - \sum_{i=1}^{M_c+M_{ash}} F_{a,i}, \quad (6)$$

$$\frac{d(\rho_g u_g c_g t_g)}{dz} = 6 \sum_{i=1}^{M_c+M_{ash}} \alpha_{conv,i} (t_{p,i} - t_g) \frac{\beta_i}{\delta_i} - Q_{rad,g \rightarrow \text{экp}} + \sum_{i=1}^{M_c+M_{ash}} Q_{rad,i \rightarrow g} + k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} Q_{CO+O_2}, \quad (7)$$

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j} c_{p,j} t_{p,j})}{dz} = [(k_{C+O_2j} Q_{C+O_2j} + k_{C+0,5O_2j} Q_{C+0,5O_2j}) C_{O_2j}^w - k_{C+CO_2j} C_{CO_2j}^w Q_{C+CO_2j} - \alpha_{conv,j} (t_{p,j} - t_g)] \frac{6\beta_j}{(\delta_{C,j} \rho_{C,j})} - Q_{rad,j \rightarrow \text{экp}} / \rho_{C,j} - Q_{rad,j \rightarrow g} / \rho_{C,j} - Q_{cond,j \rightarrow \text{экp}} / \rho_{C,j} - \gamma \beta_j u_{p,j} c_{p,j} t_{p,j}, \quad (8)$$

$$\frac{d(\beta_s u_{p,s} c_{p,s} t_{p,s})}{dz} = -\alpha_{conv,s} (t_{p,s} - t_g) \frac{6\beta_s}{\delta_s \rho_{ash,s}} - \frac{Q_{rad,s \rightarrow \text{экp}}}{\rho_{ash,s}} - \frac{Q_{rad,s \rightarrow g}}{\rho_{ash,s}} - \frac{Q_{cond,s \rightarrow \text{экp}}}{\rho_{ash,s}} - \gamma \beta_s u_{p,s} c_{p,s} t_{p,s}. \quad (9)$$

Правые части уравнений (1)–(4) учитывают влияние гетерогенных и гомогенной химических реакций, уменьшение расхода частиц кокса в центральной части топки, обусловленной их диффузией в пристеночную зону. Уравнения (6) включают в себя силы тяжести и аэродинамического сопротивления, градиент давления, изменение импульса частиц в реакционной зоне за счет их миграции из ядра в КЗ. Правая часть уравнения (7) учитывает конвективный и радиационный теплообмен между частицами и газом,

лучистое тепло, переданное газовой фазой испарительным экранам НП и тепловыделение из-за гомогенной реакции. Слагаемые правой части уравнения (8) описывают конвективный теплообмен коксовых частиц с несущей средой, тепловыделение гетерогенных реакций, лучистый теплообмен частиц с настенными экранами НП и газом, кондуктивный теплообмен между твердой фазой и испарительными экранами, перенос энthalпии дисперсной фазы из ядра в КЗ. Температура золовых фракций (см. (9)) определяется

конвективным и радиационным теплообменом между золой и газовой смесью, лучистым и кондуктивным теплообменом между примесью и теплообменными поверхностями НП, переносом энthalпии золовых частиц из реакционной зоны в периферийную область.

На основании системы уравнений (1)–(9) разработана программа для расчета аэродинамики, тепломассообмена и горения полидисперсного ансамбля частиц кокса и золы в ядре потока НП топки с ЦКС.

Некоторые численные результаты. Обсудим результаты поверочных расчетов трех вариантов рабочего процесса в НП топки котла с ЦКС Старобешевской ТЭС производительностью 652 т/ч, предназначенного для сжигания смеси отсева АШ и шламов при следующих исходных данных.

Вариант I: $\beta_{C01}=7,89 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C02}=8,31 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C03}=1,89 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C04}=8,59 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{C05}=6,4 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{C06}=4,06 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{ash0}=0,0208$; $B_{C01}=284776$ кг/ч; $B_{C02}=299935$ кг/ч; $B_{C03}=68216$ кг/ч; $B_{C04}=31004$ кг/ч; $B_{C05}=23099$ кг/ч; $B_{C06}=14654$ кг/ч; $B_{ash0}=9,53 \cdot 10^7$ кг/ч; $E_{C+O_2}=128 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $E_{C+O_2,SO_2}=140,8 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $\gamma=0,08896$ м⁻¹ [1].

Вариант II: $\beta_{C01}=0,00018147$; $\beta_{C02}=0,00019113$; $\beta_{C03}=4,347 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C04}=1,9757 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C05}=1,472 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C06}=9,338 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{ash0}=0,0208$; $B_{C01}=654985$ кг/ч; $B_{C02}=689851$ кг/ч; $B_{C03}=156897$ кг/ч; $B_{C04}=71309$ кг/ч; $B_{C05}=53129$ кг/ч; $B_{C06}=33704$ кг/ч; $B_{ash0}=9,53 \cdot 10^7$ кг/ч; $E_{C+O_2}=140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $E_{C+O_2,SO_2}=154 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $\gamma=0,08896$ м⁻¹ [1].

Вариант III: $\beta_{C01}=5,84 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C02}=6,15 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C03}=1,4 \cdot 10^{-5}$; $\beta_{C04}=6,36 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{C05}=4,74 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{C06}=3 \cdot 10^{-6}$; $\beta_{ash0}=0,007$; $B_{C01}=210785$ кг/ч; $B_{C02}=221974$ кг/ч; $B_{C03}=50530$ кг/ч; $B_{C04}=22955$ кг/ч; $B_{C05}=17108$ кг/ч; $B_{C06}=10828$ кг/ч; $B_{ash0}=3,19436 \cdot 10^7$ кг/ч; $E_{C+O_2}=140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $E_{C+O_2,SO_2}=154 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $\gamma=0$.

Во всех вариантах: $\delta_{C01}=0,075$ мм; $\delta_{C02} =$

$=0,15$ мм; $\delta_{C03}=0,2575$ мм; $\delta_{C04}=0,3575$ мм; $\delta_{C05}=0,515$ мм; $\delta_{C06}=0,815$ мм; $\delta_{ash}=0,12$ мм; $B_{O_2,0}=158008$ кг/ч; $B_{CO_2,0}=59905$ кг/ч; $B_{N_2,0}=674838$ кг/ч; $B_{H_2O}=19405$ кг/ч; $B_{SO_2}=2894$ кг/ч; $\rho_C=1300$ кг/м³; $\rho_{ash}=1650$ кг/м³; $t_g=t_{pi}=835$ °С; $H_{fb}=27,5$ м; $f_{fb}=140$ м²; $t_{exp,fb}=450$ °С. Отметим, что варианты I и II рассчитываются по модели, в которой учитывается изменение расхода дисперсной фазы под влиянием двух факторов: перетока частиц из ядра в КЗ ($\gamma \neq 0$) и гетерогенных реакций. В отличие от вариантов I и II, в III используется модель, где расход твердой фазы уменьшается за счет второго фактора ($\gamma = 0$).

Подобно [2] проанализируем правомерность принятой гипотезы о пренебрежимо малом влиянии пристеночной области на рассматриваемый процесс (см. выше). Для этого с использованием двухзонной модели [2], описывающей аэродинамическую структуру газа и монодисперсного потока частиц в НП топки котла с ЦКС Старобешевской ТЭС, были проведены численные исследования при $\beta_{d0}=0,14$, $\beta_{fb,e}=0,00182$, $\delta=0,12$ мм, $u_{g0}=6$ м/с, $\rho_g=0,32$ кг/м³. Результаты расчетов показывают, что: а) средние (по высоте НП) значения сечения $\langle f_d \rangle$ и расхода газовой фазы $\langle B_{g,d} \rangle$ в КЗ малы по сравнению с поперечным сечением топки f_{fb} и количеством газа на входе в ядро потока: $\langle f_d \rangle / f_{fb} = 0,0679$ (рис. 1, в, кривая 8) и $\langle B_{g,d} \rangle / B_{g,c0} = 0,051$; б) функции $u_{g,c}(z)$ и $u_{p,c}(z)$ слабо изменяются по высоте НП (рис. 1, б, кривые 3, 4), в то время как концентрации β_m , β_c и расход $B_{p,c}$ частиц уменьшаются практически на порядок: $B_{p,c,e} / B_{p,c0} = 0,0905$, $\beta_{m,e} / \beta_{m0} = 0,0994$ и $\beta_{c,e} / \beta_{c0} = 0,1125$ (рис. 1, а, кривые 1, 2). Исходя из этого, с целью упрощения модельных представлений о рабочем процессе в НП, будем пренебрегать влиянием пристеночной зоны, однако будем учитывать изменение расхода и концентрации рециркулирующих частиц по высоте топки, что дает основание использовать систему уравнений (1)–(9) для расчета аэродинамики, тепловых и физико-химических процессов в реакционной зоне.

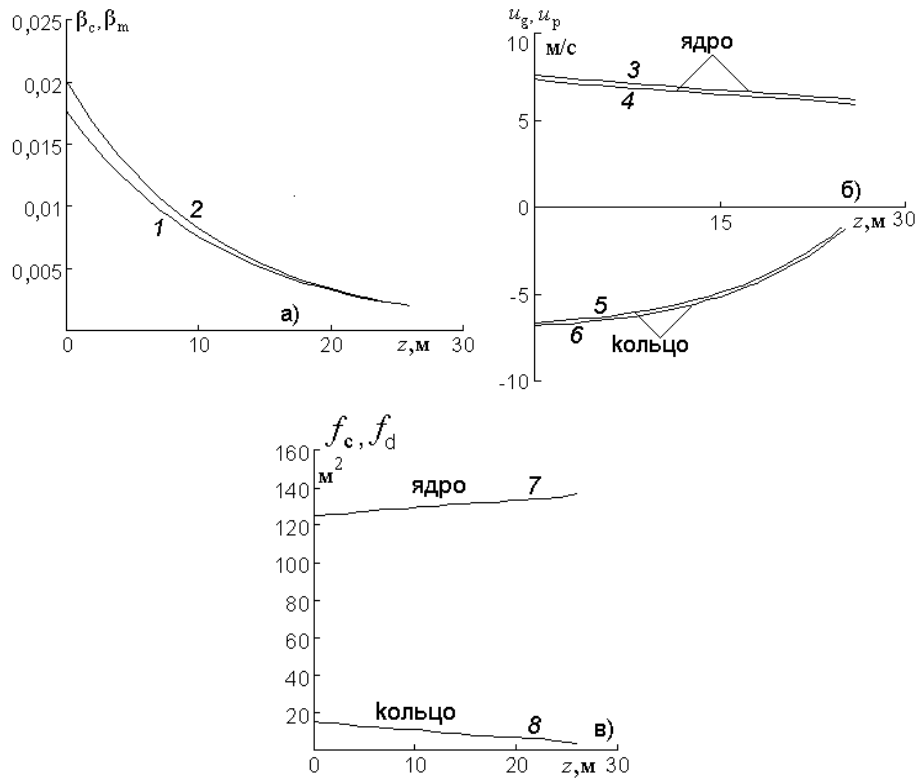


Рис. 1. Распределение объемной концентрации частиц (а), скоростей фаз (б) и сечения (ядро, кольцо) (в) по высоте НП: 1 – β_c ; 2 – β_m ; 3 – $u_{g,c}$; 4 – $u_{p,c}$; 5 – $u_{g,d}$; 6 – $u_{p,d}$; 7 – f_c ; 8 – f_d .

Для проверки адекватности модели аэродинамики, представленной в [2], проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [3], полученными на холодной пилотной установке $H_{\text{п}} = 8 \text{ м}$, $f_{\text{п}} = 0,126 \text{ м}^2$ и $t_g = 20^\circ\text{C}$ для двух сортов монодисперсных частиц (см. рис. 2,3). Первый сорт – равновесный крекинг-катализатор US-260: $u_{g0} = 2,9 \text{ м/с}$, $\delta = 0,085 \text{ мм}$, $\rho_p = 1500 \text{ кг/м}^3$, $\beta_{d0} = 0,45$, $\beta_{\text{п},e} = 0,001$. Второй – зола: $u_{g0} = 3,7 \text{ м/с}$, $\delta = 0,12 \text{ мм}$, $\rho_p = 2600 \text{ кг/м}^3$, $\beta_{d0} = 0,45$, $\beta_{\text{п},e} = 0,0008$. Из рисунков 2, 3 следует, что расчетные значения удовлетворительно согласуются с опытными данными.

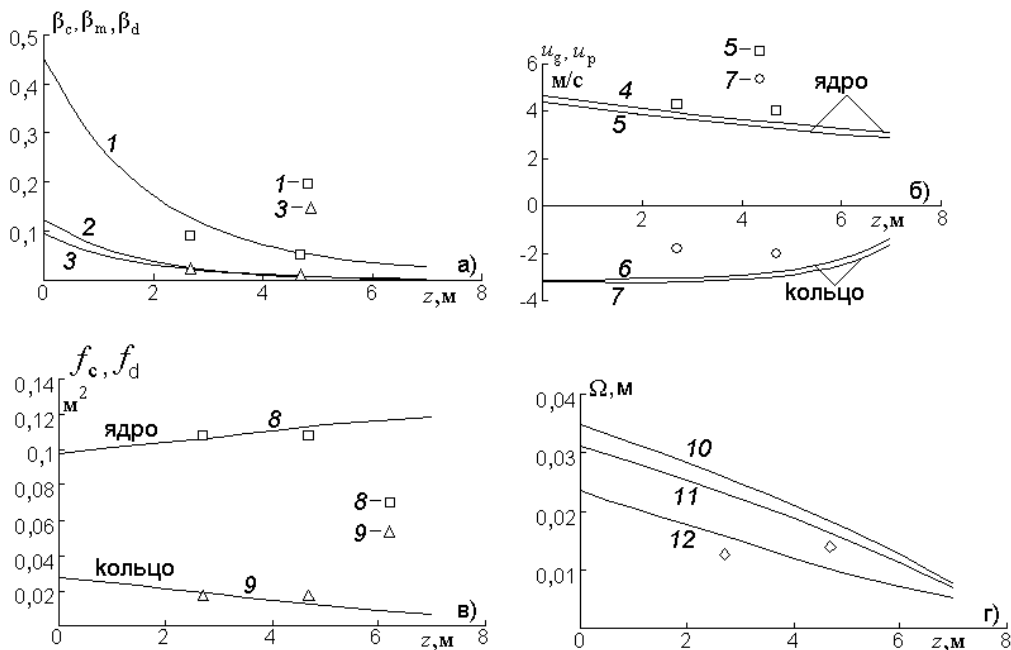


Рис. 2. Распределение экспериментальных ($\diamond, \square, \Delta, \circ$) и расчетных значений объемной концентрации частиц диаметром 0,085 мм (а), скоростей фаз (б), сечения (ядро, кольцо) (в) и толщины кольцевой зоны (г) по высоте НП: 1 – β_d ; 2 – β_m ; 3 – β_c ; 4 – $u_{g,c}$; 5 – $u_{p,c}$; 6 – $u_{g,d}$; 7 – $u_{p,d}$; 8 – f_c ; 9 – f_d ; 10 – Ω (эмпирическая зависимость [5]); 11 – то же [4]; 12 – то же (методика расчета [2]).

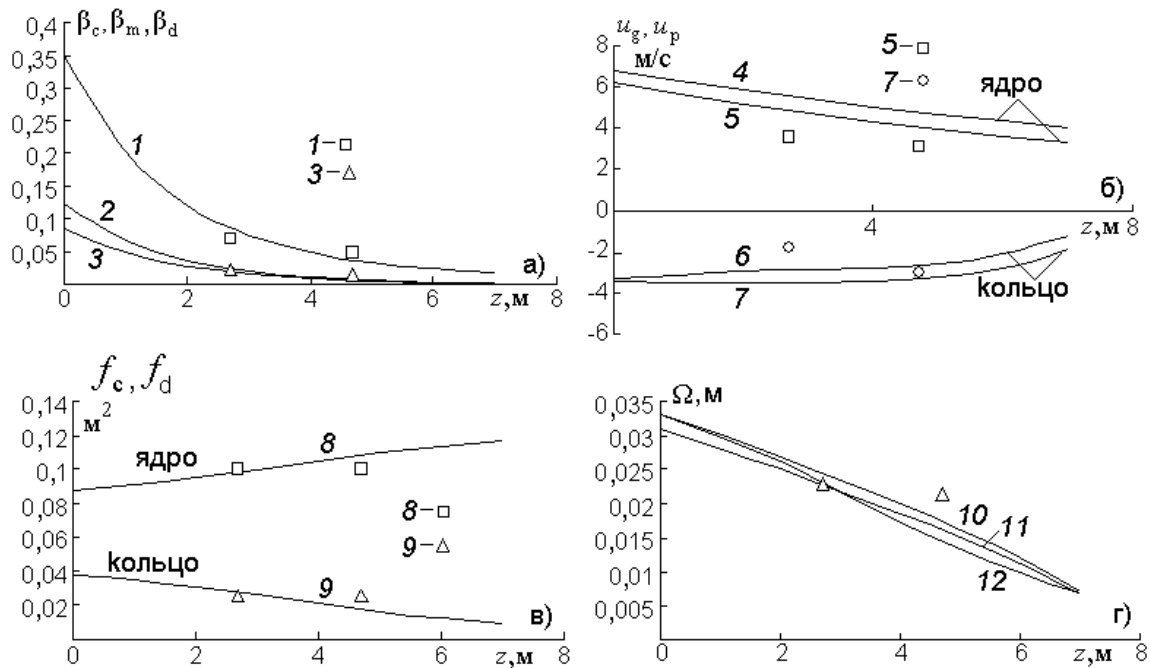


Рис. 3. Распределение экспериментальных (\square, Δ, \circ) и расчетных значений объемной концентрации частиц диаметром 0,12 мм (а), скоростей фаз (б), сечения (ядро, кольцо) (в) и толщины кольцевой зоны (г) по высоте НП:

1 – β_d ; 2 – β_m ; 3 – β_c ; 4 – $u_{g,c}$; 5 – $u_{p,c}$; 6 – $u_{g,d}$; 7 – $u_{p,d}$; 8 – f_c ; 9 – f_d ; 10 – Ω (эмпирическая зависимость [5]); 11 – то же [4]; 12 – то же (методика расчета [2]).

На рис. 4 изображено тепловое состояние несущей среды и полидисперсного ансамбля коксовых и золовых частиц. Поведение функции $t_c(z)$ (рис. 4, а, кривая б) формируется на основе двух противоположно направленных факторов: тепловыделения из-за гетерогенных химических реакций и радиационного, кондуктивного и конвективного теплообмена частиц кокса с настенными экранами НП и газом (см. (8)). На восходящей ветви $0 < z < 5$ м, где первый фактор существенно превалирует над вторым, наблюдается резкий рост зависимости $t_c(z)$ и быстрое убывание функции $B_{O_2}(z)$ (рис. 5, а, кривая 3), в результате чего кривая $t_c(z)$ достигает максимума в точке $z = 5$ м – $t_{C6,max} = 990^\circ\text{C}$. На нисходящем участке $z > 5$ м, где абсолютное значение градиента $|dB_{O_2}/dz|$ значительно уменьшается, второй фактор начинает превосходить первый, поэтому функция $t_c(z)$ убывает. Из рисунка 4, а видно, что интенсивность выгорания коксовых

фракций увеличивается с ростом δ_c . При этом максимальное значение температуры крупной фракции $\delta_{C06} = 0,815$ мм превышает допустимую температуру (по условию связывания окислов серы) на 90°C . Отметим, что в потоке могут присутствовать и крупные коксозольные сrostки диаметром 0,815 мм, температура которых находится в диапазоне $900\text{--}990^\circ\text{C}$. Однако это никоим образом не отразится на организации процесса горения, описанного в работе [1], так как содержание крупных фракций размером 0,815 мм в дисперсном потоке не превышает 2%. С уменьшением диаметра коксовых частиц от 0,815 мм до 0,515 мм максимальное значение $t_{C,max}$ снижается до 920°C (рис. 4, а, кривая 5), а температура коксозольных сrostков оказывается еще ниже. Отметим, что массовая доля фракции размером 0,515 мм в дисперсном потоке составляет не более 3%. Таким образом, некоторое превышение температуры коксозольных сrostков над допустимой температурой 900°C практически не влияет на процесс улавливания SO_2 .

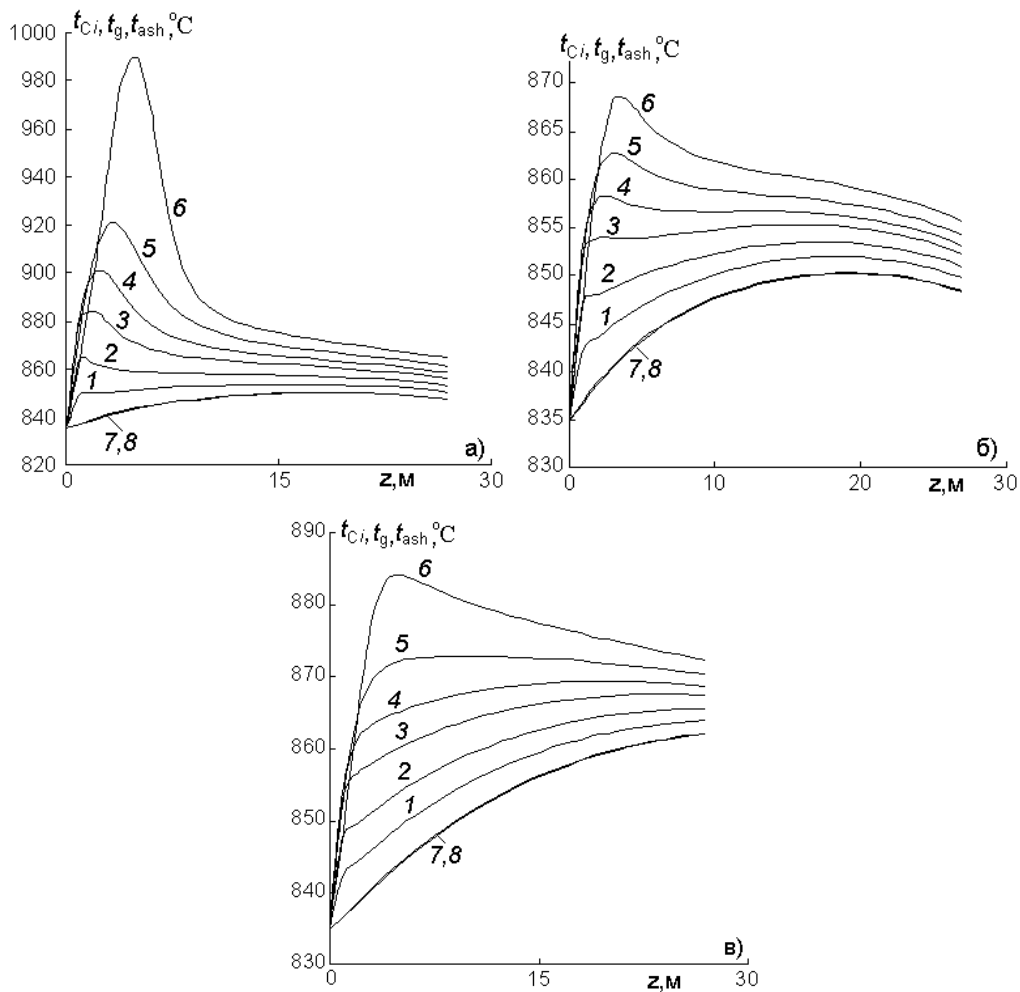


Рис. 4. Распределение температур газа, частиц кокса и золы по высоте НП для вариантов I (а), II (б) и III (в):

1 – t_{C1} ; 2 – t_{C2} ; 3 – t_{C3} ; 4 – t_{C4} ; 5 – t_{C5} ; 6 – t_{C6} ; 7 – t_g ; 8 – t_{ash} .

Если по какой-то причине на вход в НП будет поступать большое количество крупных фракций, что негативно скажется на процессе связывания окислов серы, то для устранения этого недостатка необходимо уменьшить концентрацию O_2 в дымовых газах на выходе из кипящего слоя путем увеличения в нем перепада давлений. Такое решение позволяет существенно снизить уровень температур коксозольных сродков в НП, тем самым создать благоприятные условия для организации режима горения смеси отсева АШ и шламов в топке котла с ЦКС с максимальным улавливанием окислов серы.

Анализ численных исследований показывает, что значение температуры газодисперсного потока на выходе из НП оказывается на 4-5,5% ниже величины $t_{b,e}$, приведенной в [1]. Это говорит о том, что существует некий дополнительный запас по температуре на выходе из топки, в

пределах которого можно управлять процессом горения твердого топлива.

На интенсивность выгорания частиц кокса оказывает влияние энергия активации гетерогенных реакций $C + O_2 = CO_2$ и $2C + O_2 = 2CO$. С ростом E_{C+O_2} от $128 \cdot 10^3$ до $140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль и $E_{C+0,5O_2}$ от $140,8 \cdot 10^3$ до $154 \cdot 10^3$ кДж/кмоль значения температур t_{Cj} в области максимальных тепловыделений уменьшаются (ср. рис. 4, а и рис. 4, б), а концентрация углерода в рециркулирующей массе C_C в варианте II оказывается в 2,3 раза выше, чем в I. Заметим, что повышение концентрации C_C и понижение температуры t_{Cj} практически не отражаются на выгорании кислорода (рис. 5, а, ср. кривые 2 и 3), однако оказывают влияние на степень конверсии углеродных частиц (рис. 6).

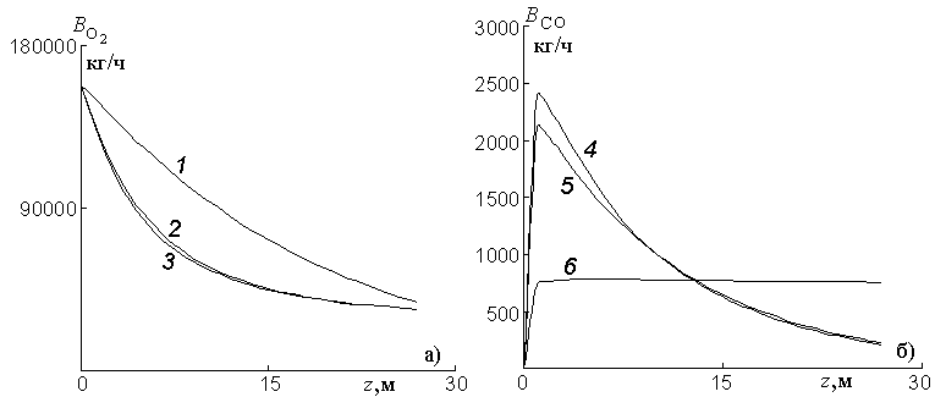


Рис. 5. Распределение расходов кислорода (а) и окиси углерода (б) по высоте НП:

1, 6 – вариант III; 2, 5 – вариант II; 3, 4 – вариант I.

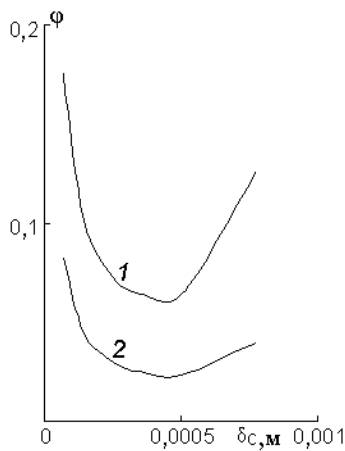


Рис. 6. Зависимость степени конверсии частиц кокса от их диаметра: 1 – вариант I; 2 – вариант II.

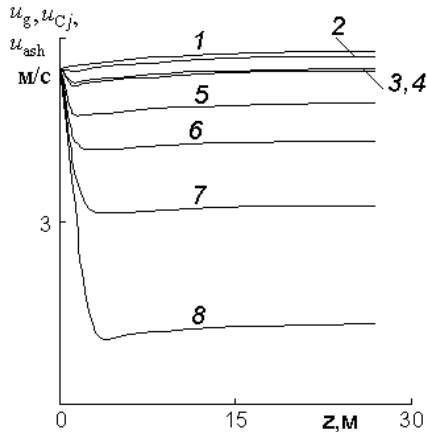


Рис. 7. Распределение скоростей газа, частиц кокса и золы по высоте НП для варианта I: 1 – u_g ; 2 – u_{C1} ;

3 – u_{ash} ; 4 – u_{C2} ; 5 – u_{C3} ; 6 – u_{C4} ; 7 – u_{C5} ; 8 – u_{C6} .

Из рис. 6 (кривая 1) видно, что функция $\phi(\delta_c)$ имеет минимум в точке $\delta_{c,min} = 0,5$ мм, который формируется под влиянием двух составляющих: удельной реакционной поверхности

углеродных частиц и времени их пребывания в НП. С увеличением размера δ_c уменьшается поверхность $6\beta_c/\delta_c$ и возрастает скорость межфазного скольжения (рис. 7). На нисходящей ветви $\delta_c < 0,5$ мм преобладающим оказывается первая составляющая, на восходящем участке – вторая (рис. 6).

На рис. 5, б показано изменение расхода окиси углерода по высоте НП. Характер зависимости $B_{CO}(z)$ определяется скоростью убывания CO из-за протекания гомогенной реакции $2CO + O_2 = 2CO_2$ и скоростью генерации окиси углерода за счет гетерогенных реакций $2C + O_2 = 2CO$ и $C + CO_2 = 2CO$. На начальном участке $0 < z < 1$ м, где скорость порождения CO оказывается выше, чем скорость выгорания окиси углерода, происходит резкое возрастание функции $B_{CO}(z)$. В интервале $1 \text{ м} < z < 27,5 \text{ м}$ поведение кривых 4, 5 отличается от характера распределения функции 6. Убывание зависимостей 4, 5 связано в основном с уменьшением реакционной поверхности $6\beta_c/\delta_c$ из-за миграции твердой фазы в пристеночную зону (рис. 8, б), в результате чего скорость производства окиси углерода оказывается меньше скорости ее выгорания. В отличие от вариантов I и II, в III реакционная поверхность $6\beta_c/\delta_c$ слабо меняется по высоте НП ($\gamma = 0$), а скорости генерации и диссипации CO достаточно близки, что обеспечивает постоянство расхода B_{CO} в рассматриваемом диапазоне (рис. 5, б, кривая 6).

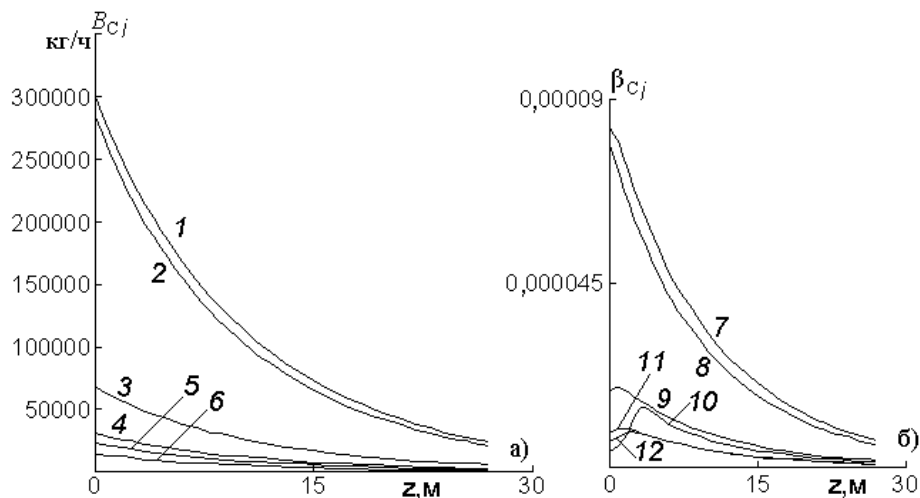


Рис. 8. Распределение расходов углерода (а) и объемных концентраций частиц кокса (б) по высоте НП для варианта I: 1 – B_{C2} ; 2 – B_{C1} ; 3 – B_{C3} ; 4 – B_{C4} ; 5 – B_{C5} ; 6 – B_{C6} ; 7 – β_{C2} ; 8 – β_{C1} ; 9 – β_{C3} ; 10 – β_{C6} ; 11 – β_{C4} ; 12 – β_{C5} .

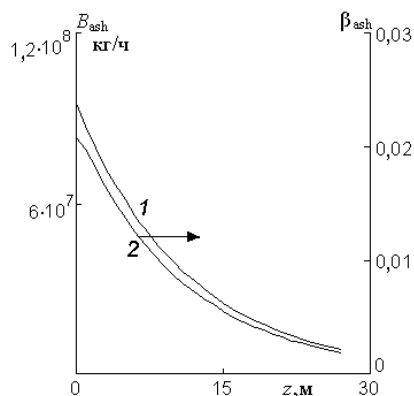


Рис. 9. Распределение расхода (1) и объемной концентрации (2) частиц золы по высоте НП для варианта I.

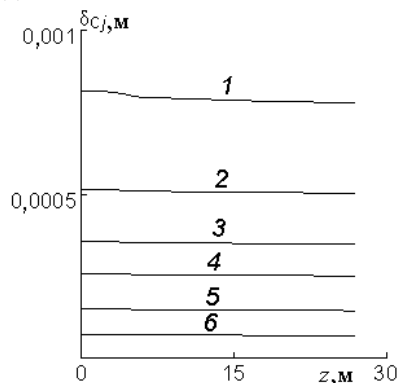


Рис. 10. Изменение диаметра коксовых частиц по высоте НП для варианта I:

1 – δ_{C6} ; 2 – δ_{C5} ; 3 – δ_{C4} ; 4 – δ_{C3} ; 5 – δ_{C2} ; 6 – δ_{C1} .

На рис. 8, 9 показано уменьшение расходов и объемной концентрации частиц кокса и золы по высоте НП. Анализ результатов расчетов показывает, что убывание зависимостей $B_{Cj}(z)$, $\beta_{Cj}(z)$, $B_{ash}(z)$, $\beta_{ash}(z)$ происходит в основном под влиянием первого фактора – миграции твердой фазы из ядра потока в КЗ (см. выше). Что касается второго фактора – гетерогенных реакций,

протекающих на поверхности углеродных частиц, то его вклад пренебрежимо мал по сравнению с первым, о чем свидетельствуют рис. 6, 10.

Убывание функций $\beta_{Cj}(z)$ и $\beta_{ash}(z)$ способствует уменьшению коэффициента теплоотдачи $\alpha_{cond,экp}$ (рис. 11; см. первое выражение (19) из [1]), благодаря чему кондуктивная составляющая тепловосприятости экранов $Q_{cond,экp}$ падает по высоте НП, в отличие от методики расчета [1], где величина $Q_{cond,экp}$ не изменяется вдоль координаты z .

Теоретические исследования показывают, что суммарное тепловосприятие настенных экранов в НП $Q_{экp,fb}$ (рис. 12) оказывается на 13% выше, чем в [1]. Такое расхождение связано с изменением функции $Q_{cond,экp}(z)$ по высоте НП за счет коэффициента $\alpha_{cond,экp}$ и температурного напора $t_{pi} - t_{экp,fb}$, а также с учетом радиационного теплообмена между газом и испарительными экранами $Q_{rad,g \rightarrow экp}$ (см. (7)).

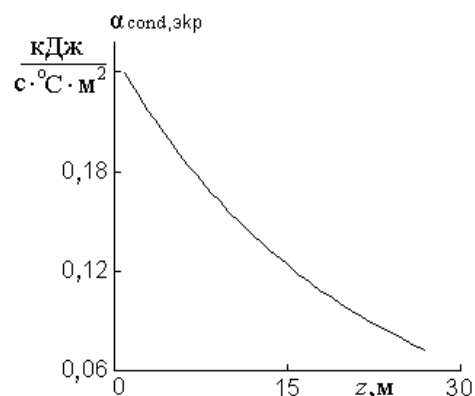


Рис. 11. Распределение коэффициента кондуктивного теплообмена по высоте НП для варианта I.

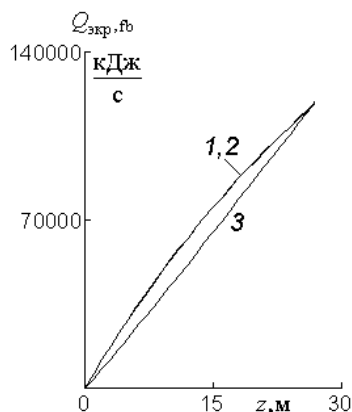


Рис. 12. Тепловий потік, воспринятый настенными экранами на участке $(0 - z)$ надслоевого пространства:

1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III.

Выводы. 1. Построена система дифференциальных уравнений, описывающая аэродинамику, тепломассообмен и горение полидисперсного ансамбля частиц кокса и золы в ядре потока с переменным расходом дисперсной фазы по высоте НП с учетом радиационного, кондуктивного и конвективного теплообмена между несущей средой и частицами, газовзвесью и экранами НП, гетерогенных и гомогенных реакций, сил тяжести и аэродинамического сопротивления.

2. Сопоставление результатов расчетов, полученных при помощи разработанной модели, с численными исследованиями, представленными в [1], показывает, что: а) температура газодисперсного потока на выходе из топки оказывается на 4–5,5% ниже приведенной в [1], т.е. существует некий дополнительный запас по температуре на выходе из НП, который может быть использован для управления процессом горения твердого топлива; б) массовая концентрация углерода в рециркулирующей массе в НП несколько меньше, чем в [1]. Это связано с тем, что константы скоростей гетерогенных реакций рассчитываются исходя из температуры частиц кокса t_{C_j} , в отличие от [1], где величина k_{C+O_2} определяется по средней температуре двухфазного потока в НП; в) тепловосприятие испарительных поверхностей в НП на 13% выше, чем в [1], из-за учета лучистого теплообмена несущей среды с настенными экранами и изменением кондуктивной составляющей по высоте топки; г) в отличие от [1], величины $\alpha_{cond,экp}$ и $Q_{cond,экp}$ уменьшаются по высоте НП, что позволяет более точно опре-

делять кондуктивную составляющую теплообмена между дисперсной фазой и испарительными экранами; д) превышение температуры коксозольных сростков над допустимой температурой $900^{\circ}C$ практически не отразится на процессе улавливания SO_2 , так как содержание крупных фракций размером $0,815$ мм в дисперсном потоке незначительно.

3. Результаты расчетов аэродинамической структуры НП удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [3].

4. Увеличение энергии активации способствует уменьшению уровня температур коксовых фракций в области максимальных тепловыделений и повышению концентрации C_C в рециркулирующей массе. Это практически не отражается на выгорании O_2 по высоте НП, но оказывает влияние на степень конверсии ф.

5. Сравнительный анализ двух методов расчета свидетельствуют о целесообразности использования полуэмпирической инженерной модели [1] в режиме online для определения и корректировки основных параметров рабочего процесса при работе котла на различных нагрузках и организации оптимального режима горения смеси отсева АШ и шламов с максимальным улавливанием окислов серы и минимальным механическим недожогом.

1. *Рохман Б.Б.* Об организации наиболее эффективного режима сжигания смеси отсева АШ и шламов в котлоагрегате с циркулирующим кипящим слоем блока № 4 Старобешевской ТЭС. 1. Методика поверочно-конструкторского расчета и анализ численных результатов // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С. 13–25.

2. *Рохман Б.Б., Топал А.С., Чернявский Н.В.* Математическое описание и численное исследование рабочего процесса в топочной камере котла с циркулирующим кипящим слоем // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 6. – С. 24–34.

3. *Hartge E.U., Rensner D., Werther J.* Solids concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds // Circulating Fluidized Bed Technology. II. Proc. 2nd Int. Conf. Oxford: Pergamon, 1988. – pp. 165–180.

4. *Теплицкий Ю.С.* Пристеночная гидродинамика циркулирующего кипящего слоя // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. – № 5. – С. 177–181.

5. *Werther J.* // Proc. 4th Int. conf. on Circulating Fluidized Beds. Pittsburg, 1993. – pp. 1–16.