

Майстренко А. Ю., Рохман Б. Б., Топал А. И., Выфатнюк В. Г.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины

О ВЛИЯНИИ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НАДСЛОЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ РЕАКТОРА С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

В последние десятилетия развитие теплоэнергетики сталкивается с серьезными проблемами эксплуатационного и экологического характера, заключающимися в снижении экономичности и надежности применяемого на тепловых электростанциях (ТЭС) оборудования и в увеличении выбросов вредных веществ. Выход из сложившейся ситуации видится во внедрении на ТЭС высокоэффективных экологически чистых энерготехнологий переработки углей. Концепция таких технологий заставляет пересмотреть достоинства традиционных факельных и слоевых способов сжигания, выдвигая на первый план системы с многократной циркуляцией (внутритопочной и внешней) коксозольных частиц – топки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), которые включают в себя преимущества пылеугольных топок (малые потери с механическим недожогом) и топок кипящего слоя (КС) (повышенная устойчивость горения, экологическая чистота). В отличие от КС и пылеугольных топок, высокие скорости псевдооживления в ЦКС (высокофорсированные режимы псевдооживления) позволяют значительно снизить количество точек ввода топлива за счет хорошего перемешивания твердой фазы, уменьшить площадь подины при аналогичной производительности, а также расширить интервал изменения тепловых нагрузок, что особенно важно для энергетических котлов, работающих в пиковых или полупиковых режимах.

Основным элементом установки с ЦКС является реактор (рис. 1), в нижней части которого находится КС, а в верхней – надслоевое пространство (НП). В центральной части НП реализуется восходящее движение газозвеси (зона ядра), а в периферийной области (кольцевая зона (КЗ)) – нисходящий плотный поток частиц, обеспечивающий

внутреннюю циркуляцию твердой фазы в топке. Из реактора двухфазный поток поступает в циклон, где происходит отделение газа от дисперсной фазы. Последняя через опускной стояк возвращается обратно в реактор.

Поскольку процессы переноса в НП протекают при сравнительно невысоких температурах (850 – 950 °С), особое внимание при конструировании подобных систем уделяется времени пребывания и концентрации (реакционной поверхности) частиц в ядре потока. Эти два гидродинамических фактора по-разному влияют на процесс горения коксозольных частиц. Так, увеличение среднего (по сечению НП) значения концентрации дисперсной фазы β_m повышает ее концентрацию в ядре потока β_c . При этом возрастает расход частиц в КЗ, которые практически не участвуют в горении из-за малой концентрации кислорода. С другой стороны, уменьшается сечение ядра, через которое проходит свыше 75% общего потока газа, что приводит к увеличению скорости газозвеси и снижению времени ее пребывания в реакционной области. Таким образом, аэродинамическая структура, присущая ЦКС, существенно влияет на процесс горения твердого топлива.

В настоящей работе при помощи математической модели [1] проведено численное исследование влияния объемной концентрации коксозольных частиц и энергии активации на аэродинамику и физико-химические процессы в надслоевом пространстве топки с ЦКС.

Система “жестких” обыкновенных дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, описывающая поведение неизотермического высококонцентрированного двухфазного потока в НП, имеет вид [1]:

$$\frac{dB_{N_2j}}{dz} = \frac{dW_{N_2j}}{dz}; \quad \frac{dB_{O_2j}}{dz} = -A_j + \frac{dW_{O_2j}}{dz}; \quad \frac{dB_{CO_2j}}{dz} = \frac{11A_j}{8} + \frac{dW_{CO_2j}}{dz}; \quad (j = d, c), \quad (1)$$

где

$$A_j = \frac{6S_j k_{C+O_2j} \beta_j B_{O_2j} C_C}{(S_j + k_{C+O_2j}) u_{gj} \delta_{нп}}; \quad \frac{dW_{\vartheta,c}}{dz} = -\frac{dW_{\vartheta,d}}{dz}; \quad (\vartheta = N_2, O_2, CO_2); \quad (2)$$

$$\frac{dB_{gj}}{dz} = \frac{3A_j}{8} + \frac{dW_{\Sigma j}}{dz}; \quad \frac{dB_{g,r}}{dz} = \frac{3(A_d + A_c)}{8}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(c_{pj}t_{pj}B_{pj})}{dz} &= \frac{A_j Q}{M_{O_2}} - 21600(\alpha_{radj} + \alpha_{convj})(t_{pj} - t_{gj}) \frac{\beta_j}{\delta_{нп}} f_j - v_{1j} c_{p,c} t_{p,c} \left| \frac{dB_{p,c}}{dz} \right| - \\ &- v_{1j} Q_{c \rightarrow d} - 7200 v_{2j} (\pi f_r)^{0,5} (\alpha_{rad,экp} + \alpha_{cond,экp})(t_{p,d} - t_{экp,нп}); \\ Q_{c \rightarrow d} &= 7200(\pi f_c)^{0,5} [a_{np,c \rightarrow d} \sigma_0 ((t_{p,c} + 273)^4 - (t_{p,d} + 273)^4) + \\ &+ v_{2j} \alpha_{conv,c \rightarrow d} (t_{g,c} - t_{p,d}) \beta_d / \beta_{max}]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(c_{gj}t_{gj}B_{gj})}{dz} &= c_{gK} t_{gK} \frac{dW_{\Sigma j}}{dz} + 21600(\alpha_{radj} + \alpha_{convj})(t_{pj} - t_{gj}) \frac{\beta_j}{\delta_{нп}} f_j - \\ &- 7200 [v_{3j} \alpha_{conv,c \rightarrow d} (t_{g,c} - t_{p,d}) (\pi f_c)^{0,5} \beta_d / \beta_{max} + \\ &+ v_{2j} (\pi f_r)^{0,5} \alpha_{conv,экp} (t_{g,d} - t_{экp,нп})]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь B_{CO_2} , B_{N_2} , B_{O_2} – расходы двуокиси углерода, азота и кислорода, кг/ч; W_{ϑ} – поток массы компонента газа ϑ между ядром и пристеночной зоной, кг/ч; z – аксиальная координата, м; S – коэффициент массообмена, м/с; k_{C+O_2} – константа скорости реакции, м/с; β – истинная объемная концентрация частиц; C_C – массовая концентрация углерода в частице; u_g – скорость газа, м/с; δ – размер частицы, м; B_g – расход газа, кг/ч; c_p , c_g – теплоемкости частиц и газа, кДж/(кг·К); t_p , t_g – температуры частиц и газа, °С; B_p – расход частиц, кг/ч; Q – тепловой эффект химической реакции $C + O_2 = CO_2$, кДж/кмоль; M_{O_2} – молекулярная масса кислорода, кг/кмоль; α_{rad} , α_{conv} – коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена между частицей и газом, кДж/(с·м²·К); f – сечение, м²; $Q_{c \rightarrow d}$ – теплообмен (конвективный + радиационный) между зонами, кДж/(ч·м); $\alpha_{rad,экp}$, $\alpha_{cond,экp}$ – коэффициенты лучистого и кондуктивно-конвективного теплообмена между нисходящим потоком частиц в КЗ и теплообменными поверхностями нагрева, кДж/(с·м²·К) [2]; $t_{экp,нп}$ – температура экранов НП, °С; $a_{np,c \rightarrow d}$ – приведенная степень черноты между зонами; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана,

$\kappa_{\text{Дж}}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$; $\alpha_{\text{conv,c}\rightarrow\text{d}}$ – коэффициент конвективного теплообмена между зонами, $\kappa_{\text{Дж}}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К})$ [2]; $\beta_{\text{max}} = 0,6$ – предельное значение объемной концентрации дисперсной фазы; $\alpha_{\text{conv,экр}}$ – коэффициент конвективного теплообмена между газом, находящимся в КЗ, и настенными экранами НП, $\kappa_{\text{Дж}}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К})$; $v_{1\text{d}} = -1$, $v_{1\text{c}} = 1$; $v_{2\text{d}} = 1$, $v_{2\text{c}} = 0$; $v_{3\text{d}} = 0$, $v_{3\text{c}} = 1$; индекс $K = \text{d, c}$ (если $dW_{\Sigma_j}/dz \geq 0$, тогда $K \neq j$; иначе $K = j$); нижние индексы p, C, g, c, d, нп, экр, rad, conv, cond, max, Σ , r относятся к частице, углероду, газу, ядру потока, кольцевой зоне, надслоевому пространству, теплообменным поверхностям нагрева, лучистому, конвективному и кондуктивному теплообмену, предельному значению, сумме компонентов газовой смеси, реактору.

Правые части уравнений (1), (3) учитывают влияние гетерогенной химической реакции и газофазный массообмен между ядром потока и пристеночной областью. Первый член правой части дифференциального уравнения (4) представляет собой тепловыделение за счет гетерогенной химической реакции, второй – лучистый и конвективный теплообмен между газом и частицами, третий – перенос энтальпии дисперсной фазы между зонами, четвертый – лучистый теплообмен между зонами, конвективный теплообмен между газом, движущимся в ядре потока, и поверхностью частиц в кольцевой зоне, расположенных на границе раздела зон (ядро – кольцо), последний – лучистый и кондуктивный теплообмен между нисходящим плотным кольцом и настенными экранами НП. Первый член правой части уравнения (5) описывает перенос энтальпии газа между зонами, второй – теплообмен между несущей средой и дисперсной фазой, третий – конвективный теплообмен между газом, движущимся в ядре потока, и поверхностью частиц в КЗ, расположенных на границе раздела зон (ядро – кольцо), последний – конвективный теплообмен между газом, находящимся в КЗ, и настенными поверхностями нагрева НП.

Приведенную систему уравнений необходимо дополнить алгебраическими соотношениями:

$$B_{p,c} = B_{p,c0} \exp(-hz); \beta_c = \beta_{c0} \exp(-h_c z); \beta_m = \beta_{m0} \exp(-hz); \quad (6)$$

$$B_{pj} = 3600 u_{pj} \beta_j f_j \rho_p; B_{p,d} = B_{p,c0} \exp(-hz) \{ \exp[-h(H_{\text{нп}} - z)] - 1 \}; \quad (7)$$

$$\frac{\beta_m - \beta_d}{\beta_c - \beta_d} = \frac{f_c}{f_r}; f_r = f_c + f_d; u_{gj} - u_{pj}(1 - \beta_j) = \text{Re}_j \eta_{gj} / \delta_{\text{нп}}; \quad (8)$$

$$\Delta P = g \rho_p \beta_{m0} [1 - \exp(-hz)] / h, \quad (9)$$

где h, h_c – постоянные спада экспоненты, 1/м; u_p – скорость частиц, м/с; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; $H_{\text{нп}}$ – высота надслоевого пространства, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ΔP – перепад давлений, Н/м²; Re – критерий Рейнольда; β_m – средняя (по сечению) концентрации дисперсной фазы; η_g – кинематическая вязкость газа, м²/с; нижние индексы 0, m относятся к начальным и средним значениям.

Граничные условия для приведенной системы уравнений (1) – (9) сформулированы в [1] и для краткости здесь не приводятся.

На основании системы уравнений (1) – (9) были разработаны алгоритм и программа, с помощью которой проводились численные исследования движения, тепломассообмена и горения АШ в НП топочной камеры парогенератора с ЦКС высотой $H_{\text{нп}} = 30$ м и сечением $f_r = 140$ м² при следующих исходных данных: вариант I: $C_C = 0,028$, $\beta_{d0} = 0,25$, $E_a = 128 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [3], $h = 0,1670$ м⁻¹, $\beta_{c0} = 0,15$; вариант II: $C_C = 0,028$, $\beta_{d0} = 0,35$, $E_a = 128 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $h = 0,1670$ м⁻¹, $\beta_{c0} = 0,15$; вариант III: $C_C = 0,044$, $\beta_{d0} = 0,3$, $E_a = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [4], $h = 0,1670$ м⁻¹, $\beta_{c0} = 0,15$; вариант IV: $C_C = 0,044$, $\beta_{d0} = 0,4$, $E_a = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $h = 0,1670$ м⁻¹, $\beta_{c0} = 0,15$; вариант V: $C_C = 0,044$, $\beta_{d0} = 0,35$, $E_a = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $h = 0,1579$ м⁻¹, $\beta_{c0} = 0,114$. В вариантах I – V: $\rho_p = 1700$ кг/м³, $Z_{O_2,b,e} = 0,091$, $P = 1$ атм, $t_{g,b} = 890$ °С, $\delta_{\text{нп}} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, $\beta_{m,e} = 0,001$, $u_{g,m0} = 5,8$ м/с (здесь $u_{g,m0}$ – средняя (по

сечению) скорость газа на входе в НП; $Z_{O_2,b,e}$ – массовая концентрация кислорода на выходе из КС; E_a – энергия активации, кДж/кмоль; нижний индекс e относится к выходному сечению НП; $t_{g,b}$ – температура КС, °С; нижний индекс b относится к слою).

На рис. 2 – 7 приведены результаты расчетов НП топки котлоагрегата с ЦКС высотой $H_{нп} = 30$ м и сечением $f_r = 140$ м². Видно, что с возрастанием объемной концентрации частиц на входе в КЗ от $\beta_{d0} = 0,25$ до $\beta_{d0} = 0,35$ (рис. 2, кривые 3, 5) происходит расширение входного сечения ядра потока (рис. 3, кривые 3, 5) и повышение величины β_{c0} от 0,087 до 0,0969 (рис. 4, кривые 2, 4). В связи с этим увеличиваются время пребывания газозвеси в реакционной зоне за счет уменьшения скоростей фаз (рис. 5 а), б), кривые 1, 3) и реакционная поверхность коксозольных частиц в ядре потока, вследствие чего степень выгорания кислорода при $C_{c,I} = C_{c,II} = 0,028$ в варианте II оказывается выше, чем в I (рис. 6, кривые 1, 3; здесь нижние индексы I, II относятся к вариантам расчета). С другой стороны, повышение концентрации β_{d0} способствует снижению расхода газа в кольцевой зоне (рис. 7, а), кривые 3, 5) и количества выгоревшего в ней окислителя (рис. 7, б), кривые 3, 5).

Результаты расчетов показывают, что уменьшение средней концентрации частиц на входе в НП от $\beta_{m0} = 0,15$ до $\beta_{m0} = 0,114$ приводит к сужению входного сечения КЗ f_{d0} (рис. 3, кривые 1, 3) и уменьшению величины β_{c0} (рис. 4, ср. кривые 2 и 5), а повышение энергии активации от $E_a = 128 \cdot 10^3$ кДж/кмоль до $E_a = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль увеличивает концентрацию углерода в рециркулирующей массе от $C_c = 0,028$ до $C_c = 0,044$. Необходимо отметить, что во всех рассматриваемых вариантах в ядре потока реализуется восходящее движение несущей среды, а у стенки реактора газовая смесь движется в противоположном направлении т. е.

возникает внутритопочная циркуляция дымовых газов, которая благоприятно влияет на подавление окислов азота.

Как отмечалось в [5], надслоевое пространство по своей аэродинамической структуре может быть разделено на две зоны: переходная зона и зона пневмотранспорта. Анализ результатов расчета показывает, что протяженность переходной зоны, характеризующейся резким изменением зависимостей $\beta_d(z)$ и $f_d(z)$, находится в диапазоне $0 < z < 20$ м (рис. 2, рис. 3), а участок $20 \text{ м} < z < 30 \text{ м}$, где $f_d \rightarrow 0$, можно с достаточной степенью точности считать зоной пневмотранспорта.

Проведенные расчеты показали, что на аэродинамическую структуру и скорость выгорания окислителя в НП огромное влияние оказывает объемная концентрация коксозольных частиц в кольцевой зоне. При понижении величины β_d происходит сужение сечения ядра потока, уменьшение времени пребывания и реакционной поверхности дисперсной фазы в приосевой зоне, вследствие чего скорость выгорания кислорода в НП уменьшается.

Резюме

Описана двухзонная стационарная полуэмпирическая модель процессов переноса в надслоевом пространстве реактора с циркулирующим кипящим слоем, на основании которой проведены широкие численные исследования особенностей аэродинамики, теплообмена и горения антрацитового штыба в ядре потока и пристеночной кольцевой зоне.

Ключевые слова: горение, уголь, циркулирующий кипящий слой, газ, кольцевая зона, ядро, надслоевое пространство, топка.

Резюме

Описана двозонна стаціонарна полу емпірична модель процесів переносу в над шаровому просторі реактора з циркулюючим киплячим шаром, на основі якої проведені широкі чисельні дослідження особливостей аеродинаміки, тепло масообміну та горіння антрацитового штибу в ядрі потоку та кільцевій зоні, яка прилягає до стінки реактора.

Ключові слова: горіння, вугілля, циркулюючий киплячий шар, газ, кільцева зона, ядро, надшаровий простір, топка.

About the impact of different factors on the processes of transfer in freeboard space of the reactor with circulating fluidized bed

Maystrenko A.Yu., Rokhman B.B., Topal A.I., Vyfatnyuk V.G.

Abstract

Two-zone stationary semi-empirical model to describe transfer processes in a freeboard space of the reactor with circulating fluidized bed is described. Based on the above model, wide range of numerical investigations of aerodynamics, heat and mass transfer, combustion for core of flow and near-to-wall ring zone for anthracite culm have been conducted.

Key words: burning, coal, fast fluidized bed, gas, annular zone, core, freeboard, furnace.

Литература

1. Рохман Б.Б. Двухзонная модель аэродинамики, тепломассообменных процессов и горения в надслоевом пространстве топки котлоагрегата с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 35–43.
2. Махорин К. Е., Хинкис П. А. Сжигание топлива в псевдоожиженном слое. К.: Наукова думка, 1989. 204 с.
3. Майстренко О. Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару. Автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 1999. 35 с.
4. Померанцев В. В., Арефьев К. И., Ахмедов Д. Б. и др. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
5. Рохман Б. Б., Шрайбер А. А. Математическое моделирование аэродинамики и физико-химических процессов в надслоевом пространстве топки с циркулирующим кипящим слоем. I. Постановка задачи. Основные уравнения аэродинамики // ИФЖ. 1993. Т. 65, № 5. С. 521–526.

Подрисуночные подписи

Рис. 1. Схема установки с циркулирующим кипящим слоем: 1 – газы, уходящие в конвективную шахту; 2 – подача исходного топлива; 3 – опускной стояк; 4 – выход сливной золы; 5 – подача воздуха под решетку; 6 – кипящий слой; 7 – кольцевая зона; 8 – ядро потока; 9 – циклон

Рис. 2. Распределение объемной концентрации частиц в КЗ по высоте НП:

1 – вариант IV; 2 – V; 3 – II; 4 – III; 5 – I

Рис. 3. Изменение сечения ядра потока по высоте НП:

1 – вариант V; 2 – IV; 3 – II; 4 – III; 5 – I

Рис. 4. Распределение объемной концентрации частиц в ядре потока по высоте НП:

1 – вариант IV; 2 – II; 3 – III; 4 – I; 5 – V

Рис. 5. Распределение скоростей частиц а) и газа б) в ядре потока по высоте НП:

1 – вариант I; 2 – III; 3 – II; 4 – IV; 5 – V

Рис. 6. Распределение расхода кислорода в ядре потока по высоте НП:

1 – вариант I; 2 – III; 3 – II; 4 – IV

Рис. 7. Распределение расходов газа а) и кислорода б) в КЗ по высоте НП:

1 – вариант V; 2 – IV; 3 – II; 4 – III; 5 – I





