

УДК. 662.6, 669.162.2, 536.46

**Калинчак В.В.<sup>1</sup>, Черненко А.С.<sup>1</sup>, Волошин В.С.<sup>2</sup>, Зинченко Ю.А.<sup>2</sup>,  
Куземко Р.Д.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, г.Одесса

<sup>2</sup>Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

### **Влияние зольности пылеугольного топлива на характеристики его сгорания в пределах фурменной зоны**

*Проводится исследование влияния доли золы в коксе угля на характеристики сжигания угольной пыли в фурменном очаге доменной печи. Зола считается отдельной инертной фракцией помимо двух фракций угольной пыли кокса. Показано, что варьирование численного состава пылеугольного топлива позволяет изменять долю целевого газа в продуктах сгорания и механическую полноту сгорания частицы ПУТ. Повышение зольности угля ведет к удлинению кислородной зоны и возрастанию полноты сгорания коксового остатка частицы. При этом снижается полнота сгорания угольной частицы по сравнению с малозольным углем. Увеличение тонины помола повышает степень сгорания, увеличивает содержание СО и уменьшает содержание углекислого газа СО<sub>2</sub> в продуктах сгорания пылеугольного топлива.*

**Введение.** Математическое моделирование горения угольной пыли в условиях взвеси пылеугольного факела является достаточно сложной задачей [1-7]. Математическая модель применима лишь при наличии корректных и точных исходных данных. Необходимо знать закон разложения и горения частицы угля, законы химической кинетики в газе и на поверхности твердой фазы. Но и при наличии таких данных об элементарных процессах сама математическая задача расчета сложных турбулентных потоков, теплообмена и химических реакций остается достаточно трудной.

Зольность или содержание минеральных (негорючих) примесей в угле, является основным показателем, определяющим качество [6-8]. В целом зола – это негорючие минеральные примеси. Большая часть их попадает при добыче из пород, между которыми залегают пласты угля, но присутствуют и минеральные вещества, перешедшие в топливо из углеобразователей или в процессе преобразования его исходной массы. Поэтому различают внутреннюю, связанную с органической частью угля, и внешнюю, слагающую породные прослой, золу. При размолу угля значительная часть внешней золы и частично внутренней, которая имеет вид зерен различных размеров, отделяется от угля. Чем мельче помол, тем больше золы отделяется от коксовых частиц. И тем меньше золы остается в коксовых частицах.

Поэтому, при сжигании коксовых частиц натуральных углей с умеренной зольностью, особенно при ее движении в пылеугольном факеле в фурменном очаге, влияние зольности на ее горение можно не учитывать.

Однако после помола угля в мельнице на мелкую пыль и отделения золы исходная транспортируемая смесь пылеугольного топлива содержит частицы-золы, масса которых близка к исходной доле золы в угле. Они в фурменном

очаге не реагируют, но нагреваются. Т.е. являются определенным инертным балластом.

**Целью данной** работы является исследование влияния доли золы в коксе угля на характеристики сжигания угольной пыли в фурменном очаге доменной печи.

**Постановка задачи.** Рассмотрим следующую задачу. Угольная пыль вдувается в поток разогретого до высокой температуры воздуха, обогащенного кислородом, и перемешивается с ним. Полученная смесь попадает в фурменный очаг, где и происходит сжигание частиц ПУТ в кислороде дутья. Массовый расход пылеугольного топлива на фурму  $\dot{m} = 20 - 25$  кг/мин при расходе воздуха  $V_g = 225$  м<sup>3</sup>/мин. Это соответствует массовой концентрации пыли 0.09 – 0.12 кг/м<sup>3</sup>. Диаметр сопла фурмы таков, что скорость истечения смеси на выходе из сопла фурмы достигает значений  $w_{1b} = 200 - 290$  м/с. Частицы угля подхватываются потоком обогащенного воздуха и разгоняются практически до скорости газа. Движение газа и частиц турбулентное, т.к. число Рейнольдса на входе в фурменный очаг около  $10^5$ . Поэтому рассматриваемые величины считаем средними для данного сечения. Длина фурменного очага  $L = 2 - 2.2$  м. Давление в доменной печи в районе фурменного очага считаем  $p = 0.36$  МПа.

Зону горения углеродных частиц (пылеугольный факел) представим в виде расширяющейся осесимметричной струи, через боковую поверхность которой возможен перенос тепла и массы. Предположим, что течение квазистационарное и все используемые величины являются функциями только координаты  $x$  – расстояния от сопла фурмы. Для определенности будем использовать индексы 1 – газ, 2 – частица.

В данной работе проведен анализ влияния массовой доли золы  $A$  (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% и 30%) на характеристики сгорания монодисперсной (диаметр частиц 30 мкм) и полидисперсной (мелкий помол – две фракции 30 и 50 мкм, грубый помол – две фракции 30 и 70 мкм) угольной пыли.

Будем считать, что зола является тугоплавкой и слабо испаряется при плавлении, диаметр зольной частицы  $d_z = 30$  мкм. То есть частица золы – обычный инертный шарик с диаметром, равным начальному размеру коксовой частицы. Средняя плотность золы  $\rho_z = 1500$  кг/м<sup>3</sup> близка к начальной плотности угля. Удельная теплоемкость золы  $c_z = 1000$  Дж/(кг·К), следовательно, количество частиц золы, которые вдуваются в единицу времени  $\frac{A}{100} \dot{N}$ . Тогда число

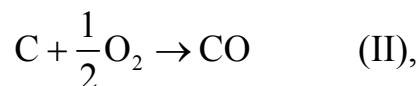
коксовых частиц –  $\frac{100 - A}{100} \dot{N}$ .

В случае бимодального распределения число частиц каждой фракции равно  $\left(\frac{100 - A}{100}\right) N_1 \dot{N}$  и  $\left(\frac{100 - A}{100}\right) N_2 \dot{N}$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – численная доля частиц мелкой и крупной фракций. Считаем, что распределение близкое к логнормальному, тогда отношение численных долей фракций  $N_1/N_2$  составляет 87,5/12,5%. Здесь  $\dot{N}$  – число частиц, поступающих в факел, 1/с:

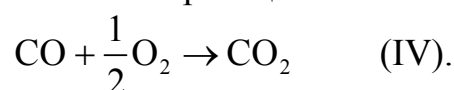
$$\dot{N} = \frac{100\dot{m}}{Am_{0z} + (100 - A)N_1m_{01} + (100 - A)N_2m_{02}},$$

где  $m_z$ ,  $m_{01}$ ,  $m_{02}$  – начальные массы частиц золы, мелкой и крупной, кг;  $\dot{m}$  – массовый расход топлива, кг/с.

На поверхности и внутри пор угольной частицы протекают три реакции взаимодействия углерода с кислородом и углекислым газом



В газовой фазе протекает гомогенная реакция



**Изменение температуры, диаметра и плотности частиц каждой фракции и частиц золы происходит согласно уравнениям [9 - 11]:**

для изменения температур частицы золы  $T_z$  и коксовых частиц мелкой (индекс 1) и крупной (индекс 2)  $T_1$  и  $T_2$ :

$$\frac{c_z \rho_z d_z}{6} \cdot u_z \frac{dT_z}{dx} = -q_{gz} - q_{wz}, \quad (1)$$

$$\frac{c\rho_1 d_1}{6} \cdot u_c \frac{dT_1}{dx} = q_{ch1} - q_{g1} - q_{w1}, \quad (2)$$

$$\frac{c\rho_2 d_2}{6} \cdot u_c \frac{dT_2}{dx} = q_{ch2} - q_{g2} - q_{w2}; \quad (3)$$

для изменения диаметров частицы золы и коксовых частиц мелкой (1) и крупной (2) фракций

$$u_c \frac{d(d_z)}{dx} = 0, \quad (4)$$

$$u_c \frac{d(d_1)}{dx} = -\frac{2\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2) \frac{\rho_{gs}}{\rho_1} Y_{O_2,s1} - \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \frac{\rho_{gs}}{\rho_1} Y_{CO_2,s1} \quad (5)$$

$$u_c \frac{d(d_2)}{dx} = -\frac{2\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2) \frac{\rho_{gs}}{\rho_2} Y_{O_2,s2} - \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \frac{\rho_{gs}}{\rho_2} Y_{CO_2,s2}, \quad (6)$$

для изменения плотностей частиц

$$\frac{1}{6} d_z u_z \frac{d\rho_z}{dx} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{1}{6} d_1 u_c \frac{d\rho_1}{dx} = -\frac{\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{gs} Y_{O_2,s1} - \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2,s1} - \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_{v3} \rho_{gs} Y_{CO_2,s1}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{6} d_2 u_c \frac{d\rho_2}{dx} = -\frac{\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{gs} Y_{O_2,s2} - \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2,s2} - \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_{v3} \rho_{gs} Y_{CO_2,s2}. \quad (9)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_1(x=0) &= T_2(x=0) = T_z(x=0) = T_b, \\ d_z(x=0) &= d_z, \quad d_1(x=0) = d_{1b}, \quad d_2(x=0) = d_{2b} \\ \rho_z(x=0) &= \rho_z, \quad \rho_1(x=0) = \rho_b, \quad \rho_2(x=0) = \rho_b. \end{aligned}$$

Здесь плотности тепловых потоков определяются по известным законам химической кинетики и тепломассообмена [9, 10]:

$$q_{w1} = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_w^4), \quad q_{w2} = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_w^4), \quad \varepsilon = \varepsilon_0 (1 - \exp(-l/r_s)), \quad l \sim 2r_s \left( \frac{\rho}{\rho_g} \right) (B^{-1} - 1),$$

$$q_{g1} = \frac{\lambda_g Nu}{d} (T_1 - T_g) + U_{sf} \rho_g c_{pg} T^*, \quad q_{g2} = \frac{\lambda_g Nu}{d} (T_2 - T_g) + U_{sf} \rho_g c_{pg} T^*,$$

$$\begin{aligned} q_{ch,j} &= (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left( \frac{100 - A}{100} \right) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2s} - \\ &- Q_3 k_3 \rho_{gs} \left( \frac{100 - A}{100} \right) \left( 1 + \frac{k_{v3}}{k_3} \right) Y_{CO_2s} - Q_3 k_3 \left( \frac{100 - A}{100} \right) \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2s}, \end{aligned}$$

$$k_i = k_{0i} \exp \left( -\frac{E_i}{RT_j} \right), \quad j = 1, 2 \text{ (частицы)}; \quad i = 1, 2, 3 \text{ (реакции)},$$

где  $q_{rad}$  – плотность теплового излучения частицы, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $q_g$  – плотность теплового потока теплопроводностью и конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $q_{ch}$  – плотность мощности химического тепловыделения, Вт/(м<sup>2</sup>К),  $k_i$  – константы химических реакций,  $A$  – зольность угля в %;  $r_s$  – характерный размер струи (радиус струи);  $l$  – длина свободного пробега излучения;  $\varepsilon_0$  – степень черноты поверхности частицы;  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана,  $T_w$  – температура стенок фурменного очага.

Первое слагаемое выражения для химического тепловыделения  $q_{ch}$  описывает химическое тепловыделение на единицу внешней поверхности в реакциях (I) и (II), второе – химическое теплопоглощение в реакции (III) на внешней поверхности и внутри пор (за счет диффузии углекислого газа внутрь частицы); третье – химическое теплопоглощение в реакции (III) внутри пор за счет реагирования углекислого газа, как продукта реакции (I).

Кинетические константы определяются по энергии активации первой реакции (например, для антрацита  $E_1 = 140030$  Дж/моль) [7]

$$k_{0i} = 100 \exp \left( \frac{E_i}{R \cdot 2600} \right), \quad \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{2C+O_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO}} = 1.1, \quad \frac{E_3}{E_1} = \frac{E_{C+CO_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO}} = 2.2.$$

Тепловые эффекты реакций:  $Q_1 = 12.343$  МДж/кгО<sub>2</sub>,  $Q_2 = 6.844$  МДж/кгО<sub>2</sub>;  $Q_3 = 4$  МДж/кгСО<sub>2</sub>;

Для гомогенной реакции:  $E_4 = 96.3$  кДж/моль,  $k_{04} = 7.05 \cdot 10^6$  1/с,  $Q_4 = 10.2$  МДж/кгСО.

Реакция (IV) идет по первому порядку по угарному газу. При концентрации кислорода ниже 5 % скорость данной реакции становится пропорциональной концентрации кислорода:

$$k_4 = \begin{cases} k_{04} \exp\left(-\frac{E_4}{RT_g}\right) & \text{при } Y_{O_2} > 0.05 \\ k_{04} \frac{Y_{O_2}}{0.05} \exp\left(-\frac{E_4}{RT_g}\right) & \text{при } Y_{O_2} < 0.05 \end{cases}$$

Концентрации кислорода  $O_2$  и углекислого газа  $CO_2$  у поверхности плотной частицы ПУТ с учетом стефановского течения (результатирующий массовый поток газа, возникающий при химических реакциях и направленный от поверхности углеродной частицы) определяются согласно выражениям [9, 10]:

$$Y_{O_2,s} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} Y_{O_2},$$

$$Y_{CO_2,s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \left( \frac{k_1 \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) - a_{v3} k_3}{\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3}} \right) Y_{O_2,s} + \frac{\beta}{(\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3})} Y_{CO_2},$$

$$U_{s0} = \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} \left( (k_1 + 2k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) + k_3 a_{v3} \right) \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Y_{O_2} +$$

$$+ \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \left( \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{C_2}} \frac{k_1 \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) - k_3 a_{v3}}{\beta + k_3 + k_{v3}} \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Y_{O_2} + \left( \frac{\beta}{\beta + k_3 + k_{v3}} \right) Y_{CO_2} \right),$$

где  $\beta = \frac{D_g Nu}{d}$  – коэффициент массопереноса кислорода к поверхности, м/с;  $U_{s0}$  – скорость стефановского течения у поверхности частицы, м/с;  $Y_{O_2}$ ,  $Y_{CO_2}$  – средние относительные массовые концентрации кислорода и углекислого газа в газовой смеси,  $\mu$  – молярные массы, кг/моль.

Константы внутреннего реагирования по реакциям (I) и (II)  $k_v$  и реакции (III)  $k_{v3}$  определяются, согласно [7, 9]

$$k_v = \frac{2D_v}{d} (Se_v cth Se_v - 1), \quad k_{v3} = \frac{2D_v}{d} (Se_{v3} cth Se_{v3} - 1),$$

$$a_{v3} = \frac{k_1 d^2 F_v}{4D_v} \frac{1}{(Se_{v3}^2 - Se_v^2)} \left( \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} - \frac{k_{v3}}{k_3} \right), \quad Se_v = \sqrt{\frac{F_v d^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}}, \quad Se_{v3} = \sqrt{\frac{k_3 d^2 F_v}{4D_v}}.$$

Здесь  $Se_v$ ,  $Se_{v3}$  – число Семенова, определяющее относительную роль химического реагирования на поверхности пор к массопереносу кислорода и углекислого газа, соответственно, внутри пор частицы;  $D_v$  – коэффициент внутренней диффузии в порах, м<sup>2</sup>/с;  $F_v$  – удельная поверхность пор, м<sup>-1</sup>.

**Средняя температура газа** изменяется за счет нагрева частиц двух фракций и теплообмена с частицами золы, тепловыделением при протекании гомогенной химической реакции, теплообмена факела с окружающим газом и уменьшения кинетической энергии газа:

$$c_{pg}\rho_g u_g \frac{dT_g}{dx} = \frac{q_{gz}S_z A + q_{g1}S_{c1}(100-A)N_1 + q_{g2}S_{c2}(100-A)N_2}{100S} \frac{\dot{N}}{u_g} +$$

$$+ Q_4 W_{CO(IV)} - q_{qaz} \frac{p_s}{S} - \rho_g u_g^2 \frac{du_g}{dx}$$

$$T_g(x=0) = T_{gb},$$

где  $S_z$ ,  $S_{c1}$ ,  $S_{c2}$  – площади внешней поверхности частиц золы, мелкой и крупной фракций,  $m^2$ ;  $S$  – площадь сечения пылеугольного факела в сечении с координатой  $x$ .

**Средняя концентрация кислорода в газе** в основном определяется массопереносом кислорода к поверхности частиц различных фракций и исчезновением в гомогенной реакции, а также массообменом через боковую поверхность факела:

$$-\rho_g u_g \frac{dY_{O_2}}{dx} = \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO} + \frac{j_{O_2s1}S_{c1}(100-A)N_1 + j_{O_2s2}S_{c2}(100-A)N_2}{100S} \frac{\dot{N}}{u_g} + j_{O_2qaz} \frac{p_s}{S},$$

$$Y_{O_2}(x=0) = Y_{O_2b}.$$

Аналогичным образом запишем уравнения для изменения средних концентраций углекислого и угарного газов:

$$\rho_g u_g \frac{dY_{CO_2}}{dx} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO} + \frac{j_{CO_2s1}S_{c1}(100-A)N_1 + j_{CO_2s2}S_{c2}(100-A)N_2}{100S} \frac{\dot{N}}{u_g} - j_{CO_2qaz} \frac{p_s}{S},$$

$$Y_{CO_2}(x=0) = Y_{CO_2b},$$

$$\rho_g u_g \frac{dY_{CO}}{dx} = -k_4 \rho_g Y_{CO} + \frac{j_{COs1}S_{c1}(100-A)N_1 + j_{COs2}S_{c2}(100-A)N_2}{100S} \frac{\dot{N}}{u_g} - j_{COqaz} \frac{p_s}{S},$$

$$Y_{CO}(x=0) = Y_{COb}.$$

Плотности массовых потоков кислорода к поверхности частицы  $j_{O_2s}$ , а также углекислого и угарного газов от поверхности частицы  $j_{CO_2s}$  и  $j_{COs}$  равны массовой скорости его потребления в химических реакциях:

$$j_{O_2s} = (k_1 + k_2) \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Y_{O_2s},$$

$$j_{CO_2s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_1 \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Y_{O_2s} - (k_3 + k_{v3}) \rho_{gs} Y_{CO_2s} - \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2s},$$

$$j_{COs} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_2 \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Y_{O_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \rho_{gs} Y_{CO_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2s}.$$

Плотности массового потока компонента из факела во внешнюю газовую среду:

$$j_{O_2,gaz} = \beta_{gaz} \rho_g (Y_{O_2} - Y_{O_2\infty}), \quad j_{CO_2,gaz} = \beta_{gaz} \rho_g (Y_{CO_2} - Y_{CO_2\infty}),$$

$$j_{CO,gaz} = \beta_{gaz} \rho_g (Y_{CO} - Y_{CO\infty}), \quad \beta_{gaz} = \frac{Nu D_{g,gaz}}{2r_s}, \quad D_{g,gaz} = D_{g0} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{0.75} \frac{P_0}{P} \dots$$

Изменение радиуса поперечного сечения факела оценим из закона сохранения массы газа (изменение общей массы газа, проходящей через единичный объем в единицу времени, определяется ее прибавкой в гетерогенных химических реакциях):

$$\frac{\partial(\rho_g u_g S)}{\partial x} = \left( \frac{100 - A}{100} \right) (W_{C1} N_1 S_1 + W_{C2} N_2 S_2) \dot{N} \frac{\dot{N}}{u_g}.$$

В этом случае увеличение площади поперечного сечения факела ( $S = \pi r_s^2$ ) определяется не только замедлением движения газа, но и прибавкой массы газа в результате гетерогенных реакций и уменьшением плотности газа в результате его нагрева:

$$\rho_g u_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} = \left( \frac{100 - A}{100} \right) (W_{C1} N_1 S_1 + W_{C2} N_2 S_2) \dot{N} - u_g^2 S \frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \frac{\partial T_g}{\partial x} - S \rho_g u_g \frac{\partial u_g}{\partial x}, \quad (14)$$

$$S(x=0) = S_b,$$

$$W_C = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Y_{O_2s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \left( 1 + \frac{k_{v3}}{k_3} \right) \rho_{gs} Y_{CO_2s} + \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2s}.$$

Здесь  $r_s$  – радиус поперечного сечения факела;  $S_b$  – площадь среза сопла фурмы;  $W_{C1}$ ,  $W_{C2}$  – массовые скорости преобразования углерода на единице поверхности одной частицы мелкой и крупной фракции.

Для оценки изменения средней **скорости газовой среды** используем формулу Абрамовича для осевой скорости затопленной газовой турбулентной струи, разделяя струю на начальный и основной участок [12]:

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} = \begin{cases} 0, & x < 11.17 \frac{P_0}{p} r_{sb}, \\ -\frac{u_{g1}^2}{u_{gb}} \frac{p}{p_0} \frac{1}{16r_{sb}}, & x \geq 11.17 \frac{P_0}{p} r_{sb}, \end{cases} \quad (15)$$

где  $x$  – расстояние от среза сопла фурмы,  $r_{sb}$  – радиус сопла фурмы,  $u_{gb}$  – начальная скорость газа у среза сопла фурмы.

Число Нуссельта определяет интенсивность тепло и массообмена частицы с окружающим газом внутри приведенной пленки. Он является функцией числа Рейнольдса (по частице):

$$Nu = 2 + 0.16 Re^{2/3}, \quad Re = \frac{|u_c - u_g| d}{v_{gm}}.$$

Ввиду того, что частицы ПУТ достаточно малы, то с достаточной точностью можно принять равенство средних скоростей движения частиц и газа:  $u_c \approx u_g$ . Поэтому число Нуссельта считали равным 2.

Теплофизические свойства газа, которые необходимо определить, это коэффициенты вязкости и диффузии газообразных веществ, коэффициент теплопроводности. При турбулентном движении газа эффективные коэффициенты переноса определяются через молекулярные (индекс  $m$ ) и турбулентные (индекс  $t$ ) характеристики:

$$v_g = v_{gm} + v_{gt}, D_g = D_{gm} + D_{gt}, \lambda_g = \lambda_{gm} + \lambda_{gt},$$

молекулярные:

$$v_{gm} = v_{g0} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{2.5} \frac{p_0}{p} \left( \frac{T_0 + C}{T_g + C} \right), \lambda_{gm} = \lambda_{g0} \left( \frac{T + T_g}{2T_0} \right)^{1.5} \left( \frac{T_0 + C}{(T + T_g)/2 + C} \right),$$

$$D_{gm} \approx D_{g0} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{1.75} \frac{p_0}{p}, \rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_g} \frac{p}{p_0}, \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T},$$

турбулентные (для чисел  $Re < 10^5$ ) [13]:

$$D_{gt} \approx 18 \cdot 10^{-3} u_g r_s Re_g^{-0.16} \frac{p_0}{p}, \lambda_{gt} = D_{gt} c_g \rho_g.$$

Коэффициент внутренней диффузии в порах  $D_v$  и удельная поверхность пор  $F_v$  выражается через порозность частицы  $n_v$  [7, 9]:

$$D_v = n_v^2 D_{g0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.75} \frac{p_0}{p}, n_v = 1 - \frac{\rho}{\rho_{real}},$$

$$\frac{F_v}{F_{v,b}} = \frac{n_v (1 - n_v)}{n_{v,b} (1 - n_{v,b})} = \left( \frac{1 - \rho / \rho_{real}}{1 - \rho_b / \rho_{real}} \right) \frac{\rho}{\rho_b},$$

где  $D_{g0}$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе при температуре  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с;  $F_{v,b}$  и  $n_{v,b}$  – начальная удельная поверхность пор и порозность;  $\rho_{real}$  – истинная плотность вещества частицы, кг/м<sup>3</sup>.

**Анализ результатов.** На рис. 1 представлены результаты численного расчета системы уравнений (1)-(15) горения и газификации пыли зольного угля в пределах фурменного очага. Варьирование зольности угля происходит при неизменном значении исходной массовой концентрации пыли.

Характеристиками аэровзвеси пылевых частиц являются численная  $C_N$ , массовая  $C_m$  и относительная массовая концентрация  $B$ :

$$C_N = \frac{\dot{N}}{V_g}, C_m = \frac{\dot{m}}{V_g}, B = \frac{\dot{m}}{\dot{m} + \rho_g V_g} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_g}{C_m}},$$

где  $V_g$  – объем газа, поступающего за единицу времени в факел, м<sup>3</sup>/с.

Реакционная способность совокупности частиц зависит от коэффициента избытка кислорода в газе, который определяется как отношение массы кисло-



рода, поступающего в систему, к массе кислорода, необходимо для полного превращения углерода в высший оксид (CO<sub>2</sub>):

$$\eta = \frac{m_{\text{prakt}}}{m_{\text{teor}}} = \frac{\rho_g Y_{\text{O}_2} \cdot V_g}{\frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_c} \cdot \dot{m}} = \frac{\rho_{g0} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_g} Y_{\text{O}_2} V_g}{\frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_c} \cdot \dot{m}}$$

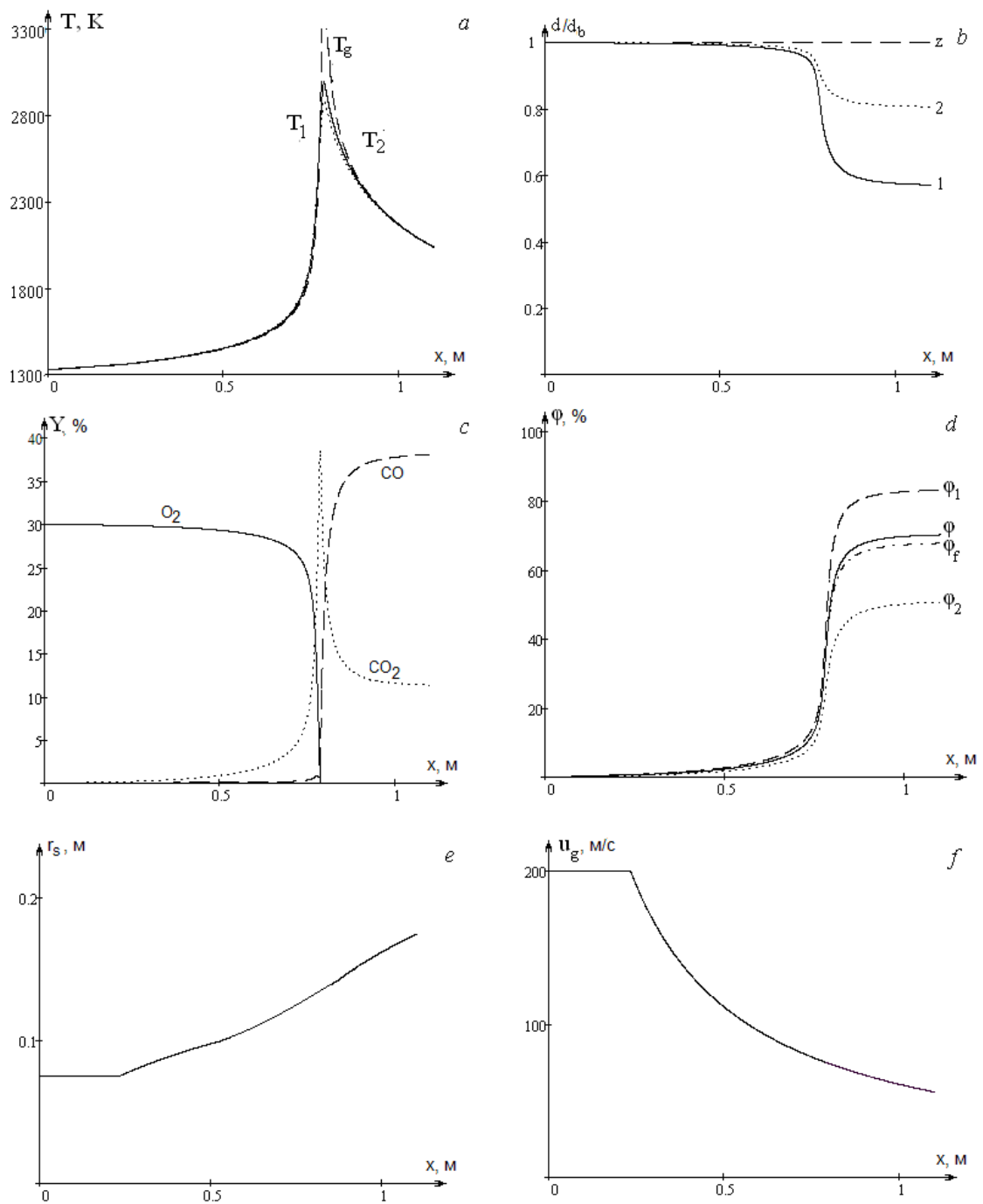
На начальном этапе, когда основным окислителем является кислород, интенсивно протекают экзотермические гетерогенные реакции (I) и (II), а также гомогенная реакция (IV). Температуры частиц и газа начинают возрастать. При этом диаметр и плотность частиц интенсивно уменьшаются. Угарный газ, который образуется в реакции (II), в дальнейшем реагирует с кислородом в реакции (IV), скорость которой очень высокая. Поэтому в газе практически отсутствует угарный газ, а содержание углекислого газа быстро возрастает. Скорость стефановского течения может достигать 30 м/с. Числа Семенова (диффузионно-кинетические отношения) возрастают за счет увеличения температуры: гетерогенные реакции переходят из кинетического в переходной режим протекания. Образование оксида и диоксида углерода в гетерогенных реакциях (I) и (II) измеримо: 1:1. Область факела, где содержание кислорода превышает 2%, носит название кислородной части зоны горения. Когда температуры невысоки и содержание угарного газа в газе очень мало – основными источниками теплоты являются частицы (частицы нагревают газ). При высокой температуре в присутствии углекислого газа и кислорода, тепловыделение в результате гомогенной реакции приводит к нагреву газом частиц.

Остальная часть факела, где в основном происходит газификация углерода по реакции (III), носит название углекислотной части зоны горения.

В качестве анализируемых величин в дальнейшем выбирались: механическая полнота сгорания частиц на границе кислородной зоны  $\varphi_{\text{ок}}$  и после погасания  $\varphi_e$ , размеры окислительной зоны  $L_{\text{ок}}$ , доля угарного и углекислого газов после самопроизвольного погасания частицы, максимальная температура частицы.

Полноту сгорания коксовой массы частиц отдельных фракций ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) и угля (ПУТ) в целом (с золой)  $\varphi_f$  определяем по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_k &= 1 - \frac{m_1 N_1 + m_2 N_2}{m_{1b} N_1 + m_{2b} N_2} = 1 - \frac{\rho_1 d_1^3 N_1 + \rho_2 d_2^3 N_2}{\rho_b d_{1b}^3 N_1 + \rho_b d_{2b}^3 N_2}, \\ \varphi_{k1} &= 1 - \frac{m_1}{m_{1b}} = 1 - \frac{\rho_1 d_1^3}{\rho_b d_{1b}^3}, \quad \varphi_{k2} = 1 - \frac{m_2}{m_{2b}} = 1 - \frac{\rho_2 d_2^3}{\rho_b d_{2b}^3}, \\ \varphi_f &= 1 - \frac{m_z 100A + m_1 (100 - A) N_1 + m_2 (100 - A) N_2}{m_z 100A + m_{1b} (100 - A) N_1 + m_{2b} (100 - A) N_2} = \\ &= 1 - \frac{\rho_z d_z^3 100A + \rho_1 d_1^3 (100 - A) N_1 + \rho_2 d_2^3 (100 - A) N_2}{\rho_z d_z^3 100A + \rho_b d_{1b}^3 (100 - A) N_1 + \rho_b d_{2b}^3 (100 - A) N_2} \end{aligned}$$



**Рис. 1.** Зависимости а) температуры частиц ПУТ и газа ( $T_{gb} = T_{1b} = T_{2b} = 1300$  К), б) относительного диаметра частиц ( $d_{1b} = 30$  мкм,  $d_{2b} = 50$  мкм,  $d_z = 30$  мкм), в) газового состава ( $Y_{O_2,b} = 30\%$ ), г) относительного изменения массы частиц, е) радиуса поперечного сечения факела, ф) скорости газа от координаты вдоль фурменного очага для случая:  $N_1 = N_2 = 50\%$ ,  $\rho_b = 1440$  кг/м<sup>3</sup>,  $\dot{m} = 20$  кг/мин,  $V_H = 225$  м<sup>3</sup>/мин,  $u_{gb} = 200$  м/с,  $P_b = 0.36$  МПа. Начальные параметры газозвеси:  $\eta_b = 1.15$ ,  $C_m = 0.094$  кг/м<sup>3</sup>,  $B = 8.9\%$ ,  $C_N = 1.65 \cdot 10^9$  м<sup>-3</sup>. Зольность угля  $A = 5\%$

Здесь  $m_1$ ,  $m_2$  – текущие массы частиц первой и второй фракций;  $N_1$ ,  $N_2$  – численная доля частиц первой и второй фракций. Невысокие массовые концентрации угольной пыли (менее  $0.09 \text{ кг/м}^3$ ) соответствуют высокому значению коэффициента избытка кислорода. В этом случае мелкие частицы сгорают уже в кислородной зоне. Дальнейшее выгорание более крупных частиц зависит от начальных значений концентраций кислорода и топлива. После исчезновения кислорода в совокупности остаются лишь частицы крупной фракции, которые успевают выгореть примерно на 50 % относительно начальной массы. При этом угарный газ практически отсутствует из-за большой скорости его окисления кислородом. Дальнейшая газификация частицы происходит в углекислом газе, присутствующим в избытке. Температура частиц крупной фракции в результате эндотермической реакции (III) быстро понижается и газификация прекращается. В результате горения такой совокупности имеем достаточно высокую полноту сгорания топлива, но очень малое содержание угарного газа в продуктах реакции.

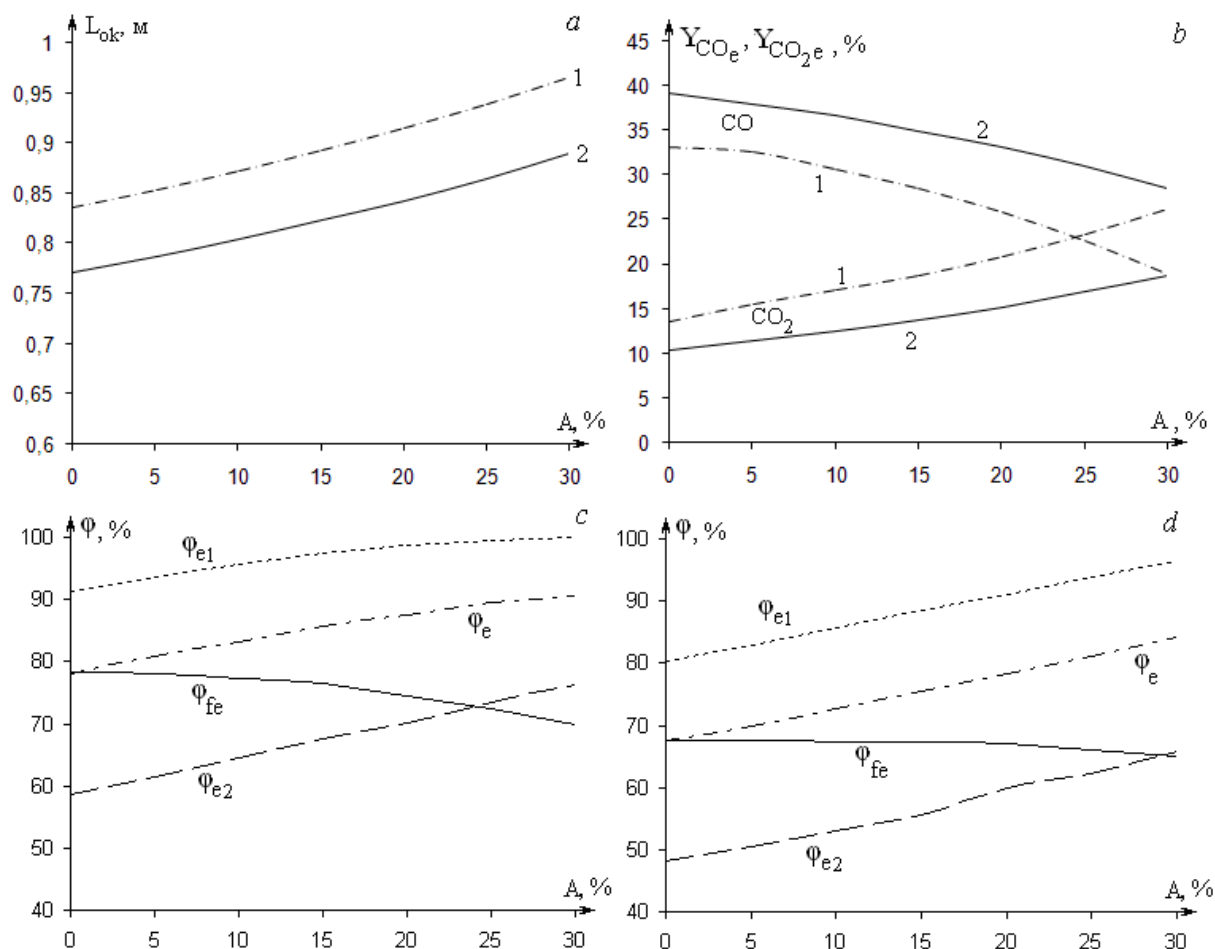
В дальнейшем анализ проводится для массовых концентраций топлива  $0.09$  и  $0.12 \text{ кг/м}^3$ , при которых начальный коэффициент избытка кислорода  $\eta$  близок к единице.

При таких значениях  $\eta$  получаем случай плотной совокупности (рис. 1). В этом случае (из-за дефицита кислорода) мелкие частицы не успевают полностью сгореть в кислородной зоне. Полнота сгорания в конце кислородной зоны для мелких частиц составляет около 75%, а более крупных – 45% при общей полноте 50%.

Таким образом, в реакции газификации (III) в углекислотной зоне участвуют все частицы. Их высокая температура приводит к появлению в продуктах реакции преимущественно угарного газа ( $Y_{\text{CO}_e} > Y_{\text{CO}_2,e}$ ). При этом частицы мелкой фракции полностью не выгорают: их полнота сгорания достигает 80-99%, несмотря на конечный их диаметр 8-18 мкм. Частицы крупной фракции выгорают до 70% при конечном диаметре около 30 мкм. Поэтому общая полнота сгорания (рис.1) определяется полнотой сгорания частиц обеих фракций.

Заметим, что начальную массовую концентрацию топлива и, следовательно, коэффициент избытка кислорода считаем постоянной. Наличие химически инертных частиц золы в пыли должно приводить к повышению количества кислорода, приходящегося на одну коксовую частицу пылеугольного топлива. В результате это должно привести к более полному ее механическому выгоранию в пределах кислородной зоны при возрастании доли золы. Механическая полнота сгорания  $\phi_{\text{ок}}$  возрастает практически линейно с ростом доли золы: повышенное значение зольности угля на 5 % приводит к возрастанию полноты сгорания коксовых частиц  $\phi_{\text{ок}}$  на 2–4%. Понижение максимальной температуры частицы при этом незначительно: в пределах 30 К. Таким образом, диаметр частицы ПУТ в конце кислородной зоны тем меньше, чем выше зольность угля.

Скорость реакции газификации мелкой частицы возрастает. Реакция переходит в переходной режим. В результате механическая полнота сгорания коксовой частицы  $\phi_e$  повышается (рис. 2). Однако общая полнота сгорания топлива



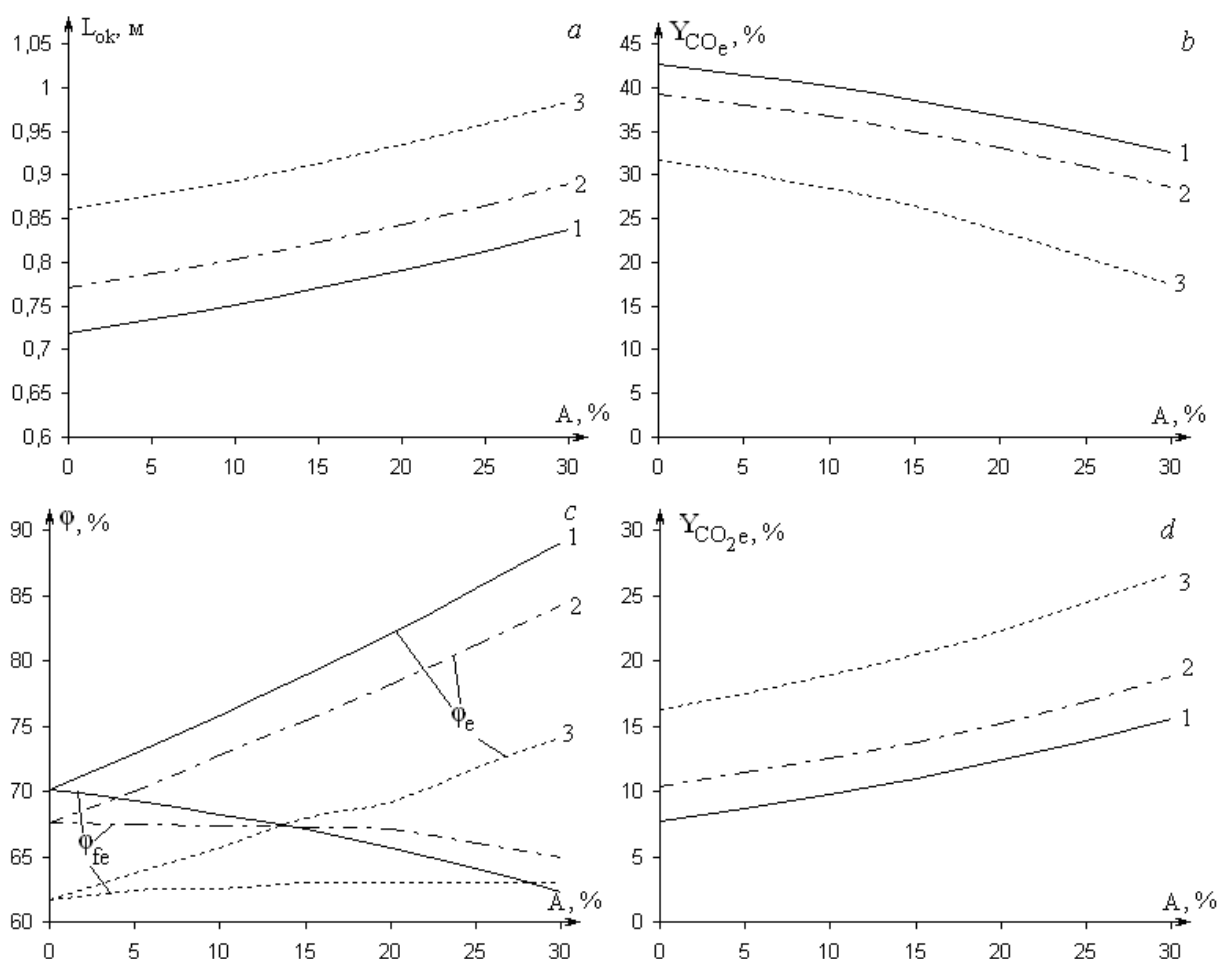
**Рис. 2.** Влияние зольности кокса угля в условиях двухфракционной взвеси на длину кислородной зоны  $L_{ok}$ , конечный газовый состав по CO и CO<sub>2</sub>, а также конечную механическую полноту сгорания коксовой массы  $\phi_e$  и в конце кислородной зоны  $\phi_{ok}$ , полноту сгорания частиц каждой фракций  $\phi_{e1}$  и  $\phi_{e2}$ , механическую полноту сгорания пылеугольного топлива (вместе с золой)  $\phi_{fe}$ . Параметры:  $T_{gb} = T_{1b} = T_{2b} = 1300$  К,  $d_z = 30$  мкм,  $\rho_b = 1440$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_H = 225$  м<sup>3</sup>/мин,  $u_{gb} = 200$  м/с,  $Y_{O_2b} = 30\%$ ,  $P_b = 0.36$  МПа.

- 1)  $\dot{m} = 20$  кг/мин,  $C_m = 0.094$  кг/м<sup>3</sup>,  $B = 8.9\%$ .
- 2)  $\dot{m} = 25$  кг/мин,  $C_m = 0.118$  кг/м<sup>3</sup>,  $B = 10.8\%$ .

$\phi_{fe}$  при этом падает из-за наличия инертного зольного остатка. Т.е. при постоянной массе подачи топлива высокозольный уголь при сгорании в фурменном очаге в целом выгорает хуже, чем низкозольный, несмотря на возрастание полноты сгорания непосредственно коксовых частиц.

Меньшее общее число частиц (часть частиц состоит из золы) снижает общую скорость восстановления углекислого газа до монооксида в пределах углекислотной зоны. Таким образом, с ростом содержания золы в угле от 0 до 30 % концентрация углекислого газа CO<sub>2</sub> повышается почти в два раза, а концентрация угарного газа CO снижается почти в 1.5 раза (рис.2).

Повышение массовой концентрации ПУТ понижает полноту сгорания каждой фракции (рис.2с,d). Чем выше концентрация пыли, тем меньше влияние зольности на полноту сгорания ПУТ.



**Рис. 3.** Влияние тонины помола угля на длину кислородной зоны  $L_{ok}$ , на конечную механическую полноту сгорания коксовой массы  $\phi_e$  и в конце кислородной зоны  $\phi_{ok}$ , механическую полноту сгорания пылеугольного топлива (вместе с золой)  $\phi_{fe}$ , конечный газовый состав по  $CO$  и  $CO_2$  при различной зольности кокса. Параметры:  $T_{gb} = T_{1b} = T_{2b} = 1300$  К,  $d_z = 30$  мкм,  $\rho_b = 1440$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_H = 225$  м<sup>3</sup>/мин,  $u_{gb} = 200$  м/с,  $Y_{O_2b} = 30\%$ ,  $P_b = 0.36$  МПа.  $\dot{m} = 20$  кг/мин,  $C_m = 0.094$  кг/м<sup>3</sup>,  $B = 8.9\%$ .

- 1)  $d_{1b} = 30$  мкм;
- 2)  $d_{1b} = 30$  мкм,  $d_{2,b} = 50$  мкм,  $N_1 = 87.5\%$ ,  $N_2 = 12.5\%$ ;
- 3)  $d_{1b} = 30$  мкм,  $d_{2,b} = 70$  мкм,  $N_1 = 87.5\%$ ,  $N_2 = 12.5\%$ .

Качественно аналогичные результаты получаем и для случая горения полидисперсной угольной пыли с содержанием частиц более крупных размеров. Так, как масса вдуваемой пыли остается неизменной, то среднее число частиц в аэрозвеси уменьшается. Среднее расстояние между частицами увеличивается, общая площадь реагирования падает. Поэтому скорость расходования кислорода в смеси также понижается. Это приводит к значительному выгоранию частиц мелких фракций уже в кислородной зоне, длина которой немного увеличивается (рис. 3). Крупные частицы выгорают меньше (до 35-40%). Дальнейшее их выгорание происходит в углекислом газе. При этом мелкие частицы полностью газифицируются. Более крупные газифицируются до 60-70%. Содержание углекислого газа в углекислотной зоне падает, и в продуктах реакции содер-

жится значительная доля угарного газа. Полнота сгорания топлива для такого состава пыли полностью определяется крупной фракцией.

Для анализа влияния грубости помола на рис. 3 сопоставлены характеристики выгорания монодисперсной аэровзвеси и двухфракционной. В обоих случаях (рис. 3с) наблюдается увеличение протяженности окислительной зоны при появлении более крупных частиц (с увеличением грубости помола).

Частицы больших размеров, как указывалось ранее, медленнее реагируют с углекислым газом  $\text{CO}_2$  до  $\text{CO}$ . Поэтому при наличии крупных частиц массовая доля угарного газа снижается на 11-17 % , соответственно, и повышается доля углекислого газа в продуктах сгорания на 10-12 % (рис. 3 b,d).

Полнота сгорания коксовой части угольной пыли понижается в пределах 20%. Это объясняется тем, что крупная частица реагирует медленнее, чем несколько мелких с той же суммарной массой (больше реакционная поверхность). Общая полнота сгорания угольной пыли (с учетом золы) меняется довольно слабо.

### **Выводы.**

Варьирование фракционного состава пылеугольного топлива позволяет изменять долю целевого газа в продуктах сгорания и механическую полноту сгорания частиц ПУТ. При этом массовая концентрация ПУТ остается постоянной. Оптимально использовать мелкие частицы при высоких расходах топлива.

Увеличение зольности угля приводит к возрастанию протяженности кислородной зоны, повышению полноты сгорания коксового остатка частицы, при этом снижается полнота сгорания угольных частиц по сравнению с мало-зольным углем. Повышение тонины помола увеличивает полноту сгорания и содержание угарного газа  $\text{CO}$  и, соответственно, снижает долю углекислого газа  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания пылеугольного топлива.

### **Литература:**

1. *Хзмалян Д. М.* Теория топочных процессов: Учеб. пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
2. *Виленский Т.В., Хзмалян Д.М.* Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 246 с.
3. *Калинчак В.В., Двойнишников В.А., Виленский Т.В.* Математическое моделирование горения взвеси частиц. Часть 1. Физико-математическая формулировка задачи // *Физика аеродисперсных систем.* – 1986. – № 29. – С. 24-29.
4. *Гавин Л.В., Медведев В.А., Наумов В.А.* Модель двухфазной турбулентной струи с учетом гетерогенного горения частиц // *Физика горения и взрыва.* – 1988. – № 3. – С. 1-17.
5. *Киро С.А., Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Клячко Л.А.* Воспламенение частиц зольного угля // *Физика горения и взрыва.* – 1983. – № 5. – С. 36-39.
6. *Kuniyoshi Ishii* Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. – Eastbourne, Elsevier Science Ltd, 2000. – 325 p.
7. *Основы практической теории горения / под. ред. В. В. Померанцева.* – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

8. *Бабич А. И., Зенк Д. Г., Гуденау Г. В., Хириш А., Клок Р.* Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах. // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ. – 2006. – С. 181 – 192.
9. *Калинчак В.В., Зинченко Ю.А., Черненко А.С.* Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами // *Металл и литье Украины.* – 2013. – № 11. – С. 14 – 25.
10. *Калинчак В. В., Зинченко Ю. А., Черненко А. С., Куземко Р. Д.* Влияние начальных параметров газа и частиц пылеугольного топлива на характеристики их горения в фурменном очаге// **Фізика аеродисперсних систем.** – 2015. – № 52. – С. 47-62.
11. *Зинченко Ю.А., Калинчак В.В., Черненко А.С., Куземко Р.Д.* Оценка доли выгорания частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге // *Металл и литье Украины.* – 2013. – № 12. – С. 9-16.
12. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – М. Наука. – 1991. – Т.1. – 600 с.
13. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740с.

***Калинчак В.В., Черненко О.С., Волошин В.С., Зінченко Ю.О., Куземко Р.Д.***  
**Вплив зольності пиловугільного палива на характеристики його згорання в межах фурменої зони**

АНОТАЦІЯ

*Проводиться дослідження впливу частки золи в коксі вугілля на характеристики спалювання вугільного пилу в фурменому вогнищі доменної печі. Зола вважається окремою інертною фракцією додатково до двох фракцій вугільного пилу коксу. Показано, що варіювання чисельного складу пиловугільного палива дозволяє змінювати частку цільового газу в продуктах згорання і механічної повноти згорання частинки ПВП. Зольність вугілля приводить до зростання протяжності кисневої зони, зростання повноти згорання коксового залишку частинки, проте зменшенню загальної повноти згорання вугільної частинки порівняно з малозольним вугіллям. Тонший помол підвищує ступінь згорання, збільшує зміст чадного газу СО і зменшує вміст вуглекислого газу СО<sub>2</sub> в продуктах згорання пиловугільного палива.*

***Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Voloshin V. S., Zinchenko Yu. A.,  
Kuzemko R. D.***

**The influence of ash-content pulverized coal particles on their burning characteristics in tuyere hearth**

SUMMARY

*Effect of ash content in coal dust on the burning characteristics in tuyere zone of blast furnace is studied. The ash is considered as an individual fraction in addition to two fractions of coal dust. It is shown, that the variation of pulverized coal fractional composition allows increase of carbon monoxide yield and fuel particles burnout. The presence of ash results in oxygen zone extension and increase of coke residue burnout. At the same time the total coal dust burnout is lower than that of low-ash coal. Fine pulverized coal combustion is characterized by increased production of carbon monoxide and reduction of carbon dioxide percentage.*