

УДК. 662.6, 667

Калинчак В.В.¹, Зинченко Ю.А.², Черненко А.С.¹, Куземко Р.Д.³

¹Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

²ПАО «ММК им. Ильича»

³Приазовский государственный технический университет

E-mail: chernalex@ukr.net

Влияние начальных параметров газа и частиц пылеугольного топлива на характеристики их горения в фурменном очаге

Проведено моделирование горения коксовых частиц в фурменном очаге с учетом стефановского потока, кинетики гетерогенных реакций окисления и газификации углерода, гомогенной реакции окисления угарного газа, турбулентного теплопереноса и теплового излучения. Угольная пыль вдувается в потоке разогретого до высокой температуры воздуха, обогащенного кислородом. В результате получены зависимости, позволяющие судить о степени влияния массового расхода угольной пыли, дисперсности пыли, температуры и массовой доли кислорода воздушного дутья на механическую полноту сгорания, длину кислородной зоны и газовый состав. При выборе оптимального соотношения между диаметром и массовым расходом частиц следует ориентироваться на коэффициент избытка кислорода в подаваемой смеси 1.1-1.2.

Введение. Одним из важнейших условий использования пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке является обеспечение его полного сгорания в пределах фурменных зон [1-3]. Поэтому контроль степени сгорания ПУТ является важной задачей. Неполнота сгорания ПУТ, особенно при больших расходах, обуславливает снижение коэффициента замены кокса и повышение содержания углерода в продуктах плавки. Попадание значительных количеств несгоревших угольных частиц за пределы фурменных зон нарушает ровность хода печи и нормальную отработку продуктов плавки, приводит к "горению" воздушных фурм, снижает технико-экономические показатели. Принято считать [2], что уголь, сжигаемый в пылевидном состоянии, должен иметь в своем составе золы не более 15-20 % и выход летучих не менее 20%. Чем меньше золы, тем лучше горит пыль. Чем больше летучих веществ содержит уголь, тем лучше воспламеняется угольная пыль, и факел горения пыли становится короче.

Расчетами показано, что по мере снижения содержания летучих и роста содержания свободного углерода в углях теоретический эквивалент замены кокса увеличивается от 0,5 – 0,6 кг кокса/кг угля для бурых и длиннопламенных углей до 1,0 – 1,1 и более для антрацитов [4]. Угли типа антрацитов и тощих, характеризующиеся высокой теплоотдачей на фурмах, более предпочтительны для вдувания, особенно при их совместном использовании с газообразным топливом.

На ПАО «ММК им. Ильича» в качестве ПУТ (кроме углей марки СС) используют частицы антрацита с небольшим содержанием золы и летучих в диапазоне размеров 10÷80 мкм со средним геометрическим размером 30 мкм [5].

Для достижения оптимальных показателей при вдувании ПУТ обычно варьируют эмпирическим путем дисперсность и массовую концентрацию угольной пыли, температуру и скорость вдуваемого воздуха, концентрацию кислорода [2, 4, 6].

Задачей данного исследования является моделирование теплообмена и горения коксовых монодисперсных частиц ПУТ, состоящего из антрацита, в фурменном очаге с учетом стефановского потока, кинетики гетерогенных реакций окисления и газификации углерода, гомогенной реакции окисления угарного газа, турбулентного теплопереноса и теплового излучения. Проводится анализ влияния начальных параметров, а именно, размера пористых частиц ПУТ, температуры дутья, массовой доли кислорода, массовой концентрации пылеугольного топлива на механическую полноту его сгорания, длину кислородной зоны и газовый состав.

Постановка задачи. Рассмотрим фурму доменной печи (рис. 1). Угольная пыль вдувается в потоке разогретого до высокой температуры воздуха, обогащенного кислородом. Подача пылеугольного топлива (ПУТ) и воздуха осуществляется отдельно. На некотором расстоянии (около 0.4 м) от выходного отверстия фурмы происходит интенсивное перемешивание этих двух потоков. После чего образующаяся смесь попадает в фурменный очаг, где и происходит сжигание частиц ПУТ в кислороде дутья.

Диаметр частиц δ_b , из которых состоит пылеугольное топливо, варьируется от 10 до 80 мкм. Массовый расход пылеугольного топлива на фурму $\dot{m} = 10 - 25$ кг/мин. Внутренний диаметр трубы, из которой истекает азот с угольным порошком, составляет 20 мм.

Степень обогащения дутьевого воздуха (по массе) Z_{O_2b} , проходящего через сопло, меняется от 23 до 38 %. Расход воздуха на одну фурму $V_g = 225$ м³/мин. Температура воздуха T_{1b} , поступающего через сопло дутьевой фурмы, за счет предварительного разогрева варьируется в пределах 900 ÷ 1400 °С. Диаметр сопла фурмы $2r_{sb} = 150$ мм. Таким образом, скорость истечения смеси на выходе из сопла фурмы $w_{1b} = 200 \div 290$ м/с. Частицы угля подхватываются потоком обогащенного воздуха и разгоняются практически до скорости газа. Движение газа и частиц турбулентное, так как на входе в фурменный очаг число Рейнольдса порядка 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 равным $p = 0.36$ МПа.

Зону горения углеродных частиц (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.

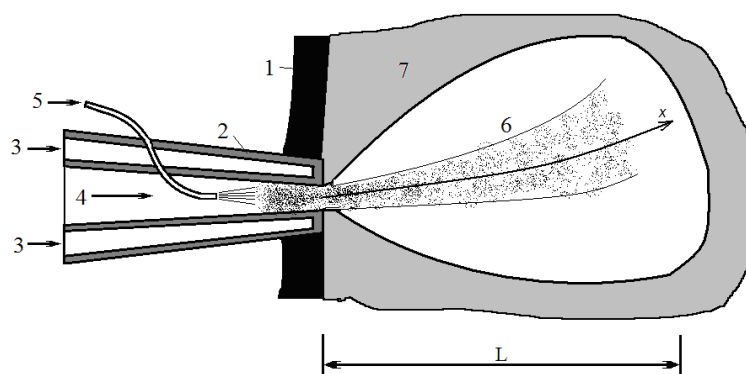


Рис. 1. Фурменная зона доменной печи:

1. Огнеупорная стенка доменной печи.
2. Водоохлаждаемая фурма.
3. Подача воды для охлаждения фурмы.
4. Подача обогащенного кислородом воздуха.
5. Подача угольного порошка в потоке азота.
6. Фурменный очаг.
7. Пространство, занятое коксом, железной рудой.

Параметры газа вне факела считаем заданными, а именно: температура $T_{1\infty}$, концентрации кислорода, углекислого и угарного газов $Z_{O_2\infty}$, $Z_{CO_2\infty}$, $Z_{CO\infty}$.

Предполагаем также в дальнейшем, что газообразные продукты реакции имеют температуру и скорость дисперсных частиц. Частицы являются коксовыми (отсутствие летучих) и сферическими.

Часто при описании горения аэрозвесей частиц используют численную C_N , массовую C_m , относительную массовую концентрацию B

$$C_N = \frac{\dot{N}}{V_g}, \quad C_m = \frac{\dot{m}}{V_g} = \frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_2 C_N, \quad B = \frac{\dot{m}}{\dot{m} + \rho_1 V_g} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_1}{C_m}}$$

Реакционная способность совокупности частиц зависит от коэффициента избытка окислителя в газе, который определим как отношение массы кислорода, поступающего в систему к массе кислорода, необходимого для полного превращения углерода в высший оксид (CO_2):

$$\eta = \frac{m_{\text{prakt}}}{m_{\text{teor}}} = \frac{\rho_1 Z_{O_2\infty} \cdot V_g}{\frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \cdot \dot{m}} = \frac{\rho_{10} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_1} Z_{O_2\infty} V_H}{\frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \cdot \dot{m}}$$

Использование η позволяет разделить горение плотных и неплотных аэрозвесей, которое качественно различно.

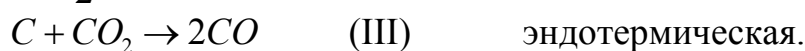
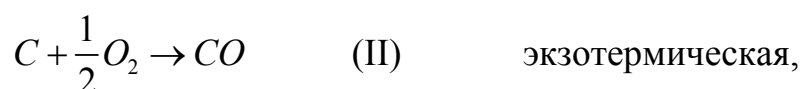
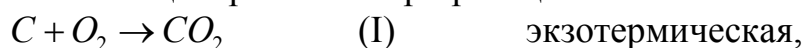
Физико-математическая модель теплообмена частицы ПУТ. При механическом смешении предварительно нагретой пыли и обогащенного кислородом воздуха начинается активное протекание химических реакций. В результате происходит тепло и массообмен между частицами и окружающим га-

зом. Интенсивность теплообмена зависит в частности и от численной концентрации частиц в газе. По известному значению массового расхода угольного топлива можно определить число частиц, поступающих в факел в единицу времени (1/с):

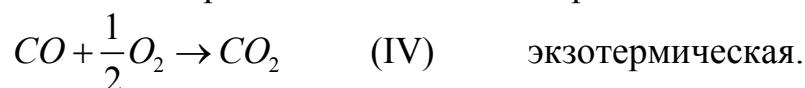
$$\dot{N} = \frac{\dot{m}}{m_0},$$

где $m_0 = \frac{\pi}{6} \rho_2 \delta_b^3$ – средняя начальная масса частицы ПУТ, ρ_2 – плотность угольной частицы. В дальнейшем предполагаем, что число частиц в процессе движения, проходящее через любое сечение факела за единицу времени, остается постоянным.

На поверхности угольной частицы протекают три реакции



В газе между частицами топлива протекает и гомогенная реакция



Скорости химических реакций по кислороду в реакциях (I) и (II) и по углекислому газу в реакции (III) зависят от концентраций газообразных компонентов по первому порядку

$$W_{O_2(I)} = k_1 \rho_1 Z_{O_2s}, \quad W_{O_2(II)} = k_2 \rho_1 Z_{O_2s}, \quad W_{CO_2(III)} = k_3 \rho_1 Z_{CO_2s}.$$

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

$$W_{CO(IV)} = \begin{cases} k_4 \rho_1 Z_{CO}, & Z_{O_2} \geq 5\% \\ k_4 \rho_1 Z_{CO} \frac{Z_{O_2}}{0.05}, & Z_{O_2} < 5\% \end{cases}.$$

Здесь k_i – константы химических реакций

$$k_i = k_{0i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_2}\right).$$

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

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

Тепловые эффекты реакций: $Q_1 = 12.343$ МДж/кг O_2 , $Q_2 = 6.844$ МДж/кг O_2 ; $Q_3 = 4$ МДж/кг CO_2 ;

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

Изменение **температуры частицы** происходит за счет тепловыделения и теплопоглощения в гетерогенных химических реакциях (I) – (III) q_{ch} , теплообмена с окружающим газом за счет молекулярной и турбулентной диффузии с учетом стефановского течения q_{mk} , направленного от частицы, а также теплообмена излучением q_{rad} со стенками шихты с учетом поглощения соседними частицами согласно уравнению:

$$\frac{c_2 \rho_2 \delta_2}{6} \cdot w_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = q_{ch} - q_{mk} - q_{rad}, \quad T_2(x=0) = T_{2b}, \quad (1)$$

$$q_{ch} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2)(1 - A) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{1s} Z_{O_2s} - Q_3 k_3 (1 - A) \left(1 + \frac{k_{v3}}{k_3} \right) \rho_{1s} Z_{CO_2s} -$$

$$- Q_3 k_3 (1 - A) \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2s},$$

$$q_{mk} = \frac{\lambda_1 Nu}{\delta_2} (T_2 - T_1) + U_{sf} \rho_1 c_2 T_*, \quad q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_3^4).$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 - \exp(-\ell / r_s)), \quad \ell \sim d_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} \right) (B^{-1} - 1),$$

где A – зольность угля в %; r_s – характерный размер струи (радиус струи); ℓ – длина свободного пробега излучения; ε_0 – коэффициент излучения поверхности частицы; T_3 – температура стенок фурменного очага.

Первое слагаемое в химическом тепловыделении 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).

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 [8]:

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

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

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

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

где $\beta = \frac{D_1 Nu}{\delta}$ – коэффициент массопереноса кислорода к поверхности; U_{s0} – скорость стефановского течения, м/с; Z_{O_2} , Z_{CO_2} – средние относительные массовые концентрации кислорода и углекислого газа в газовой смеси.

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

$$Nu = 2 + 0.16 Re^{2/3}, \quad Re = \frac{|w_2 - w_1| \delta}{v_{1m}}.$$

Константы внутреннего реагирования k_v и k_{v3} определяются согласно [7-9]:

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

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

$$Se_v = \sqrt{\frac{F_v \delta^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}}, \quad Se_{v3} = \sqrt{\frac{k_3 \delta^2 F_v}{4D_v}}.$$

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, F_v – удельная поверхность пор.

Уравнение, описывающее уменьшение диаметра и плотности частицы, легко получается из определения скорости гетерогенной реакции – скорость изменения массы в единицу времени на единицу внешней поверхности частицы. Таким образом, в результате реакций (I) – (III) происходит уменьшение со временем диаметра δ за счет поверхностных реакций и плотности ρ_2 пористой частицы за счет реагирования внутри пор [8,9]:

$$\rho_2 w_2 \frac{\partial \delta}{\partial x} = - \frac{2\mu_c}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \rho_{1s} Z_{O_2,s} - \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2,s}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{6} \delta w_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x} = - \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{1s} Z_{O_2,s} - \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2,s} - \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} k_{v3} \rho_{1s} Z_{CO_2,s}, \quad (3)$$

$$\delta(x=0) = \delta_b, \quad \rho_2(x=0) = \rho_{2b},$$

где k_1 , k_2 , k_3 – константы поверхностных химических реакций (I) – (III), м/с; k_v , k_{v3} – суммарные константы химических реакций внутри пор; a_{v3} – поправка, учитывающая восстановление CO_2 , как продукта реакции (I), в реакции (III);

Z_{O_2s} – относительная массовая концентрация окислителя на поверхности частицы; ρ_{1s} – плотность газа у поверхности частицы, кг/м³; δ_b – начальный диаметр частицы, м; ρ_{2b} – начальная плотность частицы.

Изменение **средней температуры газа** в единице объема смеси осуществляется за счет нагрева гомогенной экзотермической реакцией (IV); нагрева конвекцией углеродными частицами; теплоотдачей в окружающую газовую среду через боковую поверхность факела; нагрев газа за счет торможения струи в факеле:

$$c_1 \rho_1 w_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = Q_4 k_4 \rho_1 Z_{CO} + q_{mk} \frac{S_2}{S(1-\xi)} \frac{\dot{N}}{w_1} - q_{tor} \frac{p_s}{S(1-\xi)} - \rho_1 w_1^2 \frac{dw_1}{dx}, \quad T_1(x=0) = T_{1b}, \quad (4)$$

$$q_{tor} = \alpha_t (T_1 - T_{1\infty}), \quad \alpha_{tor} = \frac{\lambda_{1tor} Nu}{2r_s}, \quad \lambda_{1tor} = \lambda_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{0.75}, \quad \xi = \frac{\pi \delta^3 \dot{N}}{6 S w_1}.$$

Здесь $S = \pi r_s^2$ – площадь поперечного сечения факела; $S_2 = \pi \delta_b^2$ – внешняя поверхность углеродной частицы, q_{mk} – плотность теплового потока теплопроводностью и конвекцией у поверхности частицы, q_{tor} – плотность теплового потока через боковую поверхность факела к окружающему газу, p_s – периметр осевого сечения факела, ξ – доля объема смеси, занимаемого частицами ПУТ; $\dot{N}/(S w_1)$ – среднее число частиц в единице объема.

Изменение **массовой доли кислорода** в газе определяется скоростью его исчезновения в гомогенной экзотермической реакции, диффузией к поверхности углеродных частиц и диффузией в окружающую среду через боковую поверхность факела:

$$-\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{O_2}}{\partial x} = \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} k_4 \rho_1 Z_{CO} + j_{O_2s} \frac{S_2}{S(1-\xi)} \frac{\dot{N}}{w_1} + j_{O_2,tor} \frac{p_s}{S(1-\xi)}, \quad Z_{O_2}(x=0) = Z_{O_2b}. \quad (5)$$

Плотность массового потока кислорода к поверхности частицы j_{O_2s} равна массовой скорости его потребления в химических реакциях:

$$j_{O_2s} = (k_1 + k_2) \left[1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{1s} Z_{O_2s}.$$

Аналогичным образом строятся уравнения для изменения **относительных концентраций углекислого и угарного газов** и плотностей их массовых потоков у поверхности частицы:

$$\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{CO_2}}{\partial x} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CO}} k_4 \rho_1 Z_{CO} + j_{CO_2s} \frac{S_2}{S(1-\xi)} \frac{\dot{N}}{w_1} - j_{CO_2,tor} \frac{p_s}{S(1-\xi)}, \quad Z_{CO_2}(x=0) = Z_{CO_2b}, \quad (6)$$

$$\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{CO}}{\partial x} = -k_4 \rho_1 Z_{CO} + j_{COs} \frac{S_c}{S(1-\xi)} \frac{\dot{N}}{u_1} - j_{CO,tor} \frac{p_s}{S(1-\xi)}, \quad Z_{CO}(x=0) = Z_{COb}. \quad (7)$$

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

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

Плотности массового потока компонента из факела во внешнюю газовую среду:

$$j_{O_2,tor} = \beta_{tor} \rho_1 (Z_{O_2} - Z_{O_2\infty}), \quad j_{CO_2,tor} = \beta_{tor} \rho_1 (Z_{CO_2} - Z_{CO_2\infty}), \quad j_{CO,tor} = \beta_{tor} \rho_1 (Z_{CO} - Z_{CO\infty}),$$

$$\beta_{tor} = \frac{Nu D_{1tor}}{2r_s}, \quad D_{1tor} = D_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{0.75} \frac{p_0}{p}.$$

Для оценки изменения **скорости газовой среды** используем формулу Абрамовича для осевой скорости затопленной газовой турбулентной струи, предполагающую ее разделение на начальный и основной участок [10]:

$$\frac{\partial w_1}{\partial x} = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 11.17 \frac{p_0}{p} r_{sb}, \\ -\frac{w_1^2}{w_{1b}} \frac{p}{p_0} \frac{1}{16r_{sb}} & \text{при } x \geq 11.17 \frac{p_0}{p} r_{sb}, \end{cases} \quad (8)$$

где x – расстояние от среза сопла фурмы, r_{sb} – радиус сопла фурмы, w_{1b} – начальная скорость газа у среза сопла фурмы.

Для проверки адекватности используемой зависимости можно провести сравнение с графиком изменения скорости по сечению фурменного очага при вдувании природного газа [11]. В этой работе изменение скорости струи получено по заданному изменению ширины факела. Скорость на начальном этапе также практически не изменяется. В дальнейшем изменение скорости достаточно неплохо согласуется с зависимостью (7) и на длине фурменного очага 2 м принимает значения около 20÷30 м/с.

Так как частицы ПУТ достаточно малы, то с достаточной точностью можно считать равными средние скорости движения частиц и газа: $w_1 \approx w_2$.

В основе уравнения для изменения **радиуса пылеугольного факела** лежит закон сохранения массы газа (изменение общей массы газа, проходящей через единичный объем в единицу времени, определяется ее увеличением в гетерогенных химических реакциях):

$$\frac{\partial(\rho_1 w_1 S)}{\partial x} = W_c S_2 \frac{\dot{N}}{w_1}.$$

Откуда нетрудно получить уравнение для изменения площади осевого сечения факела в связи с увеличением массы газа в результате гетерогенных реакций, уменьшения плотности газа вследствие нагрева и торможения газа:

$$\rho_1 w_1^2 \frac{\partial S}{\partial x} = W_c S_2 \dot{N} - w_1^2 S \frac{\partial \rho_1}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial x} - S \rho_1 w_1 \frac{\partial w_1}{\partial x}, \quad S(x=0) = S_b, \quad (9)$$

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

Здесь S_b – площадь среза сопла фурмы, W_C – массовая скорость преобразования углерода для одной частицы.

Полученная система дифференциальных уравнений (1) – (9) позволяет в дальнейшем произвести анализ влияния различных факторов на степень выгорания углеродных частиц и массовый выход угарного газа.

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

$$v_1 = v_{1m} + v_{1t}, \quad D_1 = D_{1m} + D_{1t}, \quad \lambda_1 = \lambda_{1m} + \lambda_{1t},$$

молекулярные:

$$v_{1m} = v_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{2.5} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T_0 + C}{T_0 + C} \right), \quad \lambda_{1m} = \lambda_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{1.5} \left(\frac{T_0 + C}{T_0 + C} \right),$$

$$D_{1m} \approx D_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{n+1} \frac{p_0}{p}, \quad \rho_1 = \rho_{10} \frac{T_0}{T_1} \frac{p}{p_0}, \quad \rho_{1s} = \rho_{10} \frac{T_0}{T},$$

турбулентные (для чисел $Re < 10^5$) [12]:

$$D_{1t} \approx 18 \cdot 10^{-3} w_1 r_s Re_1^{-0.16} \frac{p_0}{p}, \quad \lambda_{1t} = D_{1t} c_1 \rho_1.$$

Коэффициент внутренней диффузии в порах D_v и удельная поверхность пор F_v выражается через порозность частицы m_v :

$$D_v = m_v^2 D_{10} \left(\frac{T_2}{T_0} \right)^{n+1} \frac{p_0}{p}, \quad m_v = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_{real}},$$

$$\frac{F_v}{F_{v,b}} = \frac{m_v (1 - m_v)}{m_{v,b} (1 - m_{v,b})} = \left(\frac{1 - \rho_2 / \rho_{real}}{1 - \rho_{2,b} / \rho_{real}} \right) \frac{\rho_2}{\rho_{2,b}},$$

где D_{10} – коэффициент диффузии кислорода в воздухе при температуре T_0 , м²/с; $F_{v,b}$ и $m_{v,b}$ – начальные удельная поверхность пор и порозность; ρ_{real} – истинная плотность вещества частицы.

Анализ результатов. Расчеты проводились для антрацита марки АШ при следующих параметрах: $Q_1 = 12,34 \cdot 10^6$ Дж/кгO₂, $Q_2 = 6,84 \cdot 10^6$ Дж/кгO₂, $Q_3 = 4,00 \cdot 10^6$ Дж/кг CO₂, $Q_4 = 10,2 \cdot 10^6$ Дж/кгCO; $k_{01} = 6,5 \cdot 10^4$, $k_{02} = 13 \cdot 10^4$ м/с; $k_{03} = 1,56 \cdot 10^8$ м/с, $E_1 = 140030$, $E_2 = 154000$, $E_3 = 308000$, $E_4 = 96300$ Дж/моль; $F_{vb} = 2 \cdot 10^5$ м⁻¹, $D_v = 7,5 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $A = 0\%$. Постоянные: $D_{10} = 3,2 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $\rho_{10} = 0,277$ кг/м³; $\lambda_{10} = 8,19 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $c_{10} = 1110$ Дж/(кг·К); $T_0 = 1273$ К; $c_2 = 947$ Дж/(кг·К); $\rho_{2b} = 1440$ кг/м³; $\epsilon_0 = 0,78$; $n = 0,75$. При расчетах использовали, что вне струи свойства смеси постоянны и равны характерным значениям в фурменном очаге: $T_{1\infty} = T_3 = 1600$ К, $Z_{O_2\infty} = 0$, $Z_{CO_2\infty} = 0$, $Z_{CO\infty} = 0,45$.

Рассмотрим случай плотной аэровзвеси, когда при вдувании смеси коэффициент избытка кислорода близок к единице (рис.2). На начальном этапе, когда основным окислителем является кислород, интенсивно протекают экзотермические гетерогенные реакции (I) и (II), а также гомогенная реакция (IV). Естественно температура частицы и газа начинают возрастать. При этом диаметр и плотность частицы интенсивно уменьшаются. Угарный газ, который образуется в реакции (II), в дальнейшем реагирует с кислородом в реакции (IV), скорость которой очень высока. 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 возрастания температуры. Образование окиси и двуокиси в гетерогенных реакциях (I) и (II) соизмеримо: 1:1. Данная зона носит название кислородной зоны. Когда температуры невысоки и содержание угарного газа в газе очень мало – основными источниками тепла являются частицы (частицы нагревают газ). Когда температуры высокие и в газе есть угарный газ и кислород, дополнительный нагрев газа в результате гомогенной реакции приводит к нагреву газом частиц.

В плотной аэровзвеси за счет большого количества частиц основная часть кислорода исчезает в гетерогенных реакциях. Диаметр частицы при этом остается достаточно большим. Однако масса непрореагировавшей углеродной частицы составляет 35÷60% от начальной. За счет турбулентности режим окисления мелких частиц определяется кинетикой реакций.

Высокие значения температуры частиц и газа, а также концентрации углекислого газа в конце кислородной зоны способствуют формированию протяженной по длине фурменного очага области газификации коксовой частицы в углекислом газе. Скорость газификации частицы существенно падает с понижением температуры до уровня 2000 К (реакция газификации эндотермическая). При этом изменение диаметра и плотности частицы практически прекращается. Доля выгорания такой частицы при высоких начальных массовых концентрациях ПУТ ($0,08 \div 0,12 \text{ кг/м}^3$) достигает 65÷90 %. Чем выше начальная массовая концентрация топлива, тем меньше коэффициент избытка кислорода и тем больше механический недожог частицы ПУТ. Данная область носит название углекислотной зоны. Вместе с изменением параметров частицы происходит замедление уменьшения концентрации углекислого газа, которая при высоких массовых концентрациях может снизиться до 5÷10 %. Массовая доля угарного газа при этом повышается до уровня 35÷50%.

При небольших массовых концентрациях пылеугольного топлива, когда коэффициент избытка окислителя больше 1, кислорода в смеси достаточно для полного сгорания углерода. Это приводит к значительному уменьшению размера и массы частицы еще в кислородной зоне. Выгорание частиц в конце кислородной зоны при малых начальных массовых концентрациях ПУТ ($0,03 \div 0,06 \text{ кг/м}^3$) достигает 80÷95%. Учет пористости частицы приводит к уменьшению плотности частицы в процессе горения.

Оценки показали, что при этом суммарная масса частицы не изменяется, т.е. диаметр частицы при ее погасании немного возрастет.

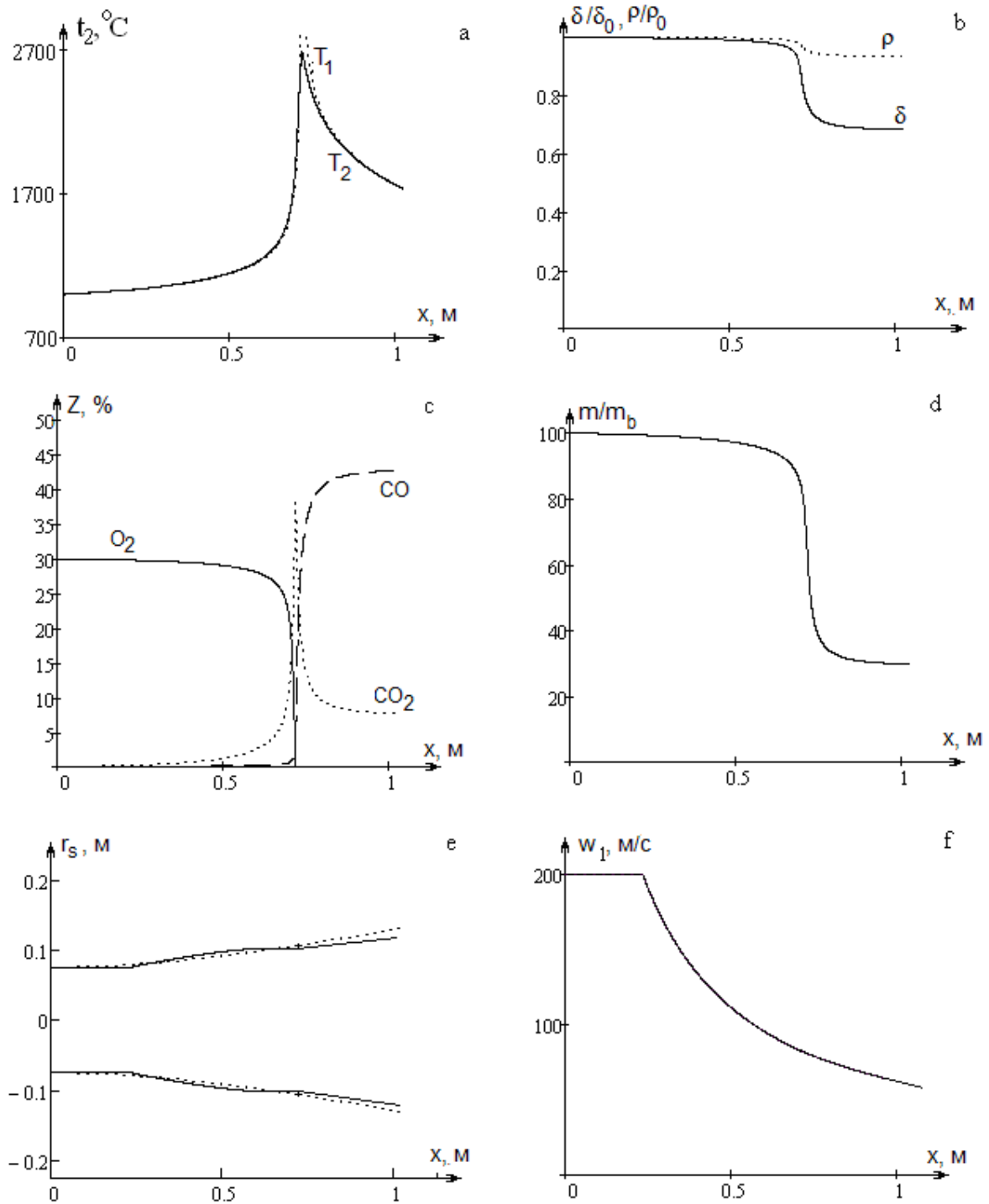


Рис 2. Зависимости а) температуры частицы и газа, б) относительного диаметра и плотности частицы, в) газового состава, д) относительного изменения массы частицы, е) поперечного сечения факела, ф) скорости газа для случая плотной совокупности от координаты фурменного очага. Параметры: $t_{1нач} = t_{2нач} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta_{нач} = 30 \text{ мкм}$, $\rho_{2нач} = 1440 \text{ кг/м}^3$, $\dot{m} = 25 \text{ кг/мин}$, $V_g = 210 \text{ м}^3/\text{мин}$, $w_{1b} = 200 \text{ м/с}$, $Z_{O_2b} = 30\%$, $p_b = 0.36 \text{ МПа}$.

Начальные параметры совокупности: $\eta_b = 0,92$, $C_m = 0,118 \text{ кг/м}^3$, $B = 10,8\%$, $C_N = 5.8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

После расходования кислорода в газе, рост температуры частиц и газа прекращается. Высокая температура способствует протеканию реакции газификации углерода в углекислом газе с высокой скоростью. Однако малая доля углерода, которая еще не сгорела в кислородной зоне (5÷20 %), не способна заметно изменить газовый состав: доля углекислого газа незначительно уменьшается, а доля угарного газа – возрастает.

Основными целями вдувания пылеугольного топлива в фурменную зону является создание высокой температуры и высокой концентрации угарного газа для обеспечения процессов восстановления железа и его плавления. При этом масса сгоревших частиц ПУТ должна быть близкой к 100 % относительно первоначальной. Исходя из анализа рассматриваемых двух случаев, следует, что оптимальными являются высокие массовые концентрации топлива.

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

Механической полнотой сгорания назовем долю прореагировавшей начальной массы углеродной частицы:

$$\varphi = \frac{m_2}{m_{2нач}} = \frac{\rho_2 \delta^3}{\rho_{2нач} \delta_{нач}^3}.$$

Длину окислительной зоны оцениваем по падению концентрации кислорода в газе ниже 0,1 % ($Z_{O_2} < 0,1\%$).

Количество углерода, сгорающего в фурменной зоне, и продуктов сгорания, образующихся в единицу времени, строго пропорционально количеству вдуваемого кислорода. В каких бы пределах ни изменялось количество дутья, весь кислород будет израсходован с образованием оксида углерода. Оставшийся углекислый газ продолжает реагировать с достаточно крупными частицами кокса, движущимися в фурменном очаге. Поэтому условия горения изменяют не общее количество продуктов сгорания в расчете на единицу сжигаемого углерода или единицу вдуваемого кислорода, а размеры зоны горения, в которой образуются горновые газы.

Влияние массовой концентрации и размера частиц пылеугольного топлива. При малых массовых расходах угольных частиц (рис. 3) вдуваемый кислород находится в избытке. Кислородная зона достаточно протяженная (0,8÷1,4 м). Частицы интенсивно реагируют, что приводит к высокой полноте сгорания (90÷100%). Это случай с коэффициентом избытка кислорода $\eta > 1.25$.

С ростом массовой концентрации пыли в 2,5 раза (в связи с увеличением скорости исчезновения кислорода в газе) длина кислородной зоны уменьшается на 10÷20%. При этом углекислый газ, который образовался преимущественно в результате гомогенной реакции в больших количествах, из-за отсутствия углеродных частиц не превращается полностью в СО в гетерогенных реакциях. При увеличении массового расхода ПУТ с 10 до 25 кг/мин (относительной массовой концентрации от 4% до 11 %) остаток СО₂ уменьшается в зависимости от диа-

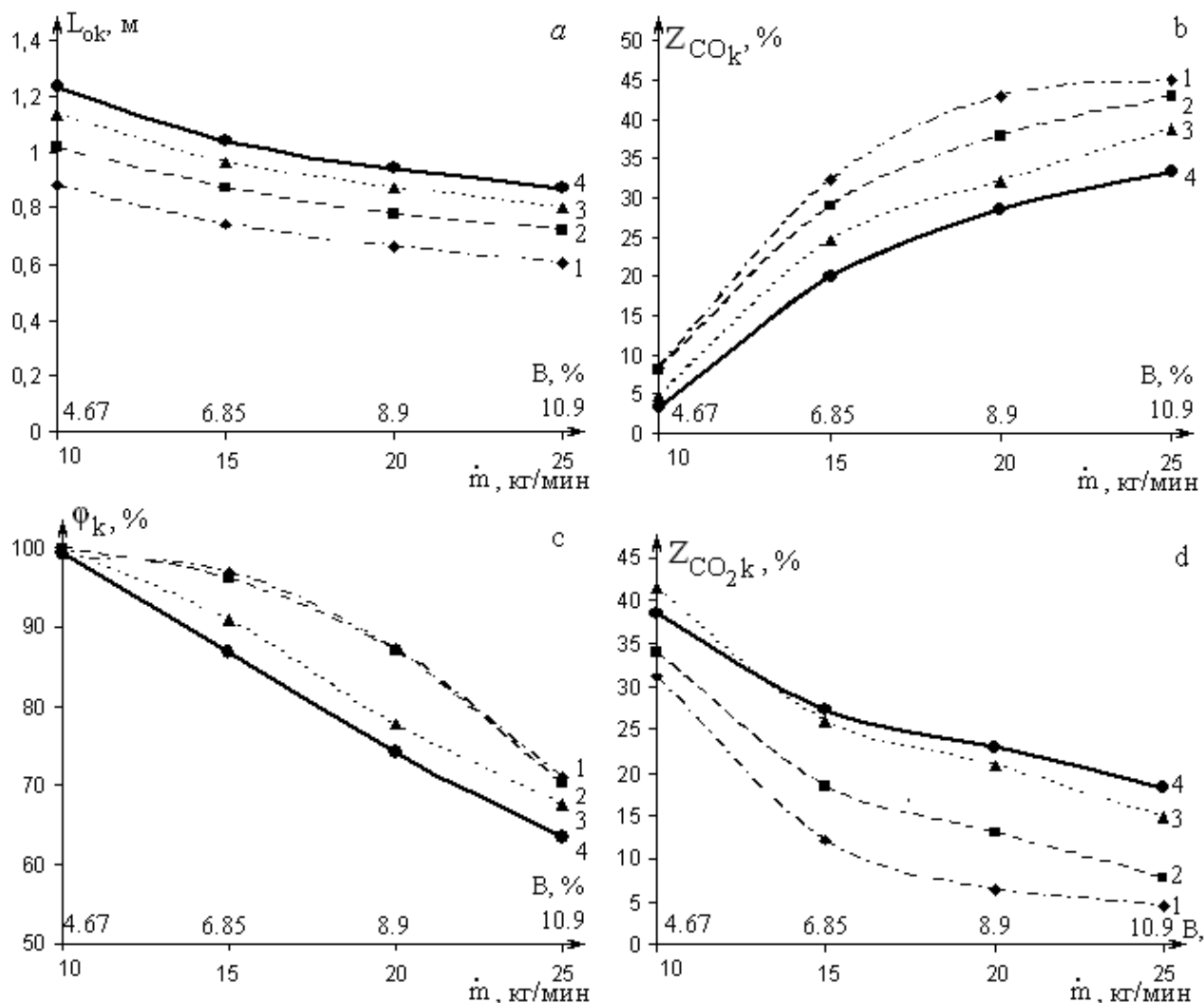


Рис. 3. Влияние массовой концентрации и размера частиц ПУТ на длину кислородной зоны $L_{ок}$, на конечную механическую полноту сгорания частиц Φ_k и конечный газовый состав по СО и CO_2 . $t_{1b} = t_{2b} = 1000^\circ\text{C}$, $\rho_{2b} = 1440 \text{ кг/м}^3$, $V_g = 210 \text{ м}^3/\text{мин}$, $w_{1b} = 200 \text{ м/с}$, $Z_{O_2b} = 30\%$, $p_b = 0,36 \text{ МПа}$.

1) $\delta_b = 20 \text{ мкм}$, 2) $\delta_b = 30 \text{ мкм}$, 3) $\delta_b = 40 \text{ мкм}$, 4) $\delta_b = 50 \text{ мкм}$.

метра частицы с 30÷45 % до 5÷20 % (рис. 3d). При этом доля угарного газа возрастает с 5÷10 % до 35÷50 % в зависимости от размера частиц (рис. 3b), что согласуется с результатами [4]. Наблюдается слабое повышение доли угарного газа в газе при расходах ПУТ от 20 до 25 кг/мин (около 5 массовых %).

Механическая полнота сгорания с ростом массового расхода частиц (от 10 до 25 кг/мин) падает на 20÷30 % в зависимости от диаметра частиц.

Количество углерода, сгорающего в единице объема окислительной зоны, зависит от величины поверхности частиц и пор, доступных проникновению газов. Чем крупнее частицы угля, и чем меньше в них пор, тем меньше реакционная поверхность и горение будет протекать менее интенсивно. Поэтому использование мелких пористых угольных частиц ПУТ будет способствовать уменьшению зоны горения и увеличению полноты сгорания таких частиц (рис. 3a).

Учет реагирования в порах приводит к небольшому уменьшению времени индукции воспламенения частицы, что способствует уменьшению протяженности кислородной и углекислотной зон. Диаметр частиц при самопроизвольном погасании уменьшается, однако за счет реагирования в порах полнота сгорания остается такой же, как и для плотной частицы.

Увеличение диаметра в 2,5 раза (от 20 до 50 мкм) приводит к удлинению окислительной зоны на 20 % в связи с ростом времени горения частицы. При этом содержание угарного газа падает при высоких расходах ПУТ на 30÷40 %, а содержание углекислого газа повышается в 3-4 раза. Механическая полнота сгорания крупных частиц при этом существенно ниже. Например при температуре дутья 1100 °С и массовой доле кислорода 30% полнота выгорания частиц 20 и 50 мкм составляют 65 и 75 %, соответственно, при массовой концентрации ПУТ 10,8%.

Поэтому использование мелких частиц при высоких расходах топлива является оптимальным. Однако слишком высокая концентрация ПУТ чревата высоким недожогом частиц. Поэтому при выборе оптимального соотношения между диаметром и расходом частиц следует ориентироваться на коэффициент избытка кислорода немного выше единицы, например 1.0 ÷ 1.2 (рис. 3.11). Диаметр частицы при постоянных расходах воздуха и ПУТ не влияет на коэффициент избытка кислорода. Снизить коэффициент избытка кислорода до оптимальных значений можно за счет увеличения температуры газа, концентрации кислорода и давления в газе, а также понижением массовой концентрации пыли.

Поэтому в дальнейшем при анализе других факторов брался массовый расход 20 кг/мин (массовая концентрация 0,093 кг/м³), как оптимальный для полного сгорания частиц ПУТ диаметром 20÷30 мкм и высокого выхода угарного газа. Тем более, что средний размер частиц пылеугольного топлива обычно близок к 30 мкм [2].

Оказалось, что максимальная температура горения слабо зависит от диаметра частиц и незначительно снижается при увеличении массовой концентрации.

Циркуляция воздуха в фурменном очаге может возвращать частицы в окислительную зону, где они повторно реагируют. Таким образом, реальная полнота выгорания может отличаться от расчетного значения.

Влияние температуры дутья и степени обогащения кислородом воздушного дутья. Повышение температуры воздуха вызывает увеличение скорости сгорания углерода. Это отражается на общем объеме смеси частиц и газов. Поэтому повышение температуры дутья всегда вызывает сокращение окислительной зоны (рис. 4а).

Увеличение начальной температуры газа приводит к небольшому возрастанию максимальной температуры горения. Полнота сгорания частиц и доля угарного и углекислого газов в продуктах сгорания практически не меняется.

Поэтому предварительный нагрев газа и частиц в определенном интервале в основном влияет на размер кислородной зоны.

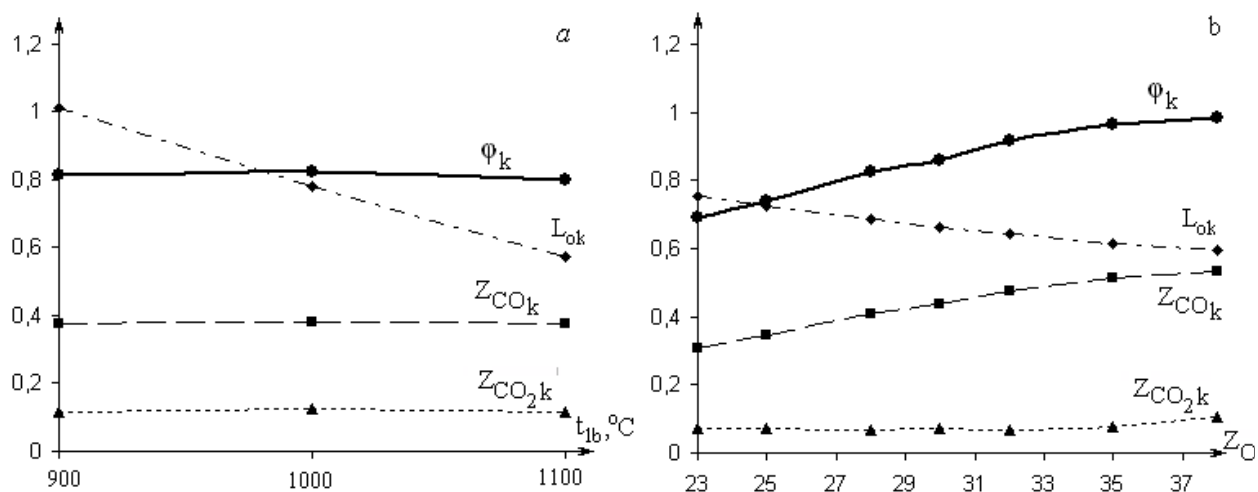


Рис. 4. Влияние а) начальной температуры газа и б) массовой доли кислорода в газе на длину кислородной зоны L_{ok} , на конечную механическую полноту сгорания φ_k и конечный газовый состав по СО и CO_2 . а) $\delta_b = 30$ мкм, $Z_{O_2b} = 30\%$; б) $\delta_b = 20$ мкм, $t_{1b} = 1000^\circ C$. Постоянные параметры: $\rho_{2b} = 1440$ кг/м³, $V_g = 210$ м³/мин, $w_{1b} = 200$ м/с, $p_b = 0,36$ МПа, $\dot{m} = 20$ кг/мин ($C_m = 0,093$ кг/м³).

При обогащении дутья кислородом на единицу вдуваемого в горн кислорода приходится меньше азота и соответственно уменьшается количество горючих газов при сжигании единицы горючего. Следовательно, выделяющееся при сгорании углерода тепло нагревает образующиеся газы до более высокой температуры. Т. е. возрастает температура частиц и газа, уменьшается зона горения (рис. 4б). Полнота сгорания частиц быстро приближается к 100%.

Содержание угарного и углекислого газов в продуктах реакции также зависит от начальной концентрации кислорода. При очень малых концентрациях кислорода в дутье – довольно длинная кислородная зона и невысокая полнота сгорания частиц. При высоких значениях концентрации кислорода создаются более благоприятные условия для глубокого протекания реакции газификации (III). Тем самым, относительная доля СО в продуктах возрастает, что подтверждают исследования [4].

Выводы:

Проведено моделирование горения коксовых частиц в фурменном очаге с учетом стефановского потока, кинетики гетерогенных реакций окисления и газификации углерода, гомогенной реакции окисления угарного газа, турбулентного теплопереноса и теплового излучения. В результате получены зависимости, позволяющие судить о степени влияния массового расхода угольной пыли, дисперсности пыли, температуры и массовой доли кислорода воздушно-го дутья на механическую полноту сгорания, длину кислородной зоны и газовый состав.

Предварительный нагрев газа и частиц (до температур выше температуры самовоспламенения) приводит к существенному уменьшению протяженности кислородной зоны. С ростом концентрации кислорода в дутье полнота сгорания

частиц быстро приближается к 100%. Окислительная зона за счет роста температуры частиц и газа и, следовательно, возрастания скоростей реакции, слабо уменьшается. Содержание угарного и углекислого газов в продуктах реакции также зависит от начальной концентрации кислорода.

Варьирование концентрации пылеугольного топлива позволяет менять долю целевого газа в продуктах сгорания и механическую полноту сгорания частицы ПУТ. При этом массовая концентрация ПУТ остается постоянной. Использование мелких частиц при высоких расходах топлива является оптимальным. Однако слишком высокая концентрация ПУТ чревата высоким недожогом частиц. Поэтому при выборе оптимального соотношения между диаметром и расходом частиц следует ориентироваться на коэффициент избытка кислорода в подаваемой смеси немного более единицы, например $1.1 \div 1.2$ (массовая концентрация $0,093 \text{ кг/м}^3$ для частиц ПУТ диаметром $20 \div 30 \text{ мкм}$). Диаметр частицы при постоянных расходах воздуха и ПУТ не влияет на коэффициент избытка кислорода. Уменьшить коэффициент избытка кислорода до оптимальных значений можно увеличением температуры газа, концентрации кислорода и давления в газе, а также понижением массового расхода топлива.

Литература:

1. Бойко В.С., Матвиенков С.А., Ярошевский С.Л., Кузин А.В., Климанчук В.В., Струтинский В.А. Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» // *Металл и литье*. – 2012. – № 2-3.
2. Кочура В.В., Ярошевский С.Л., Брага В.В. Исследование и оптимизация фракционного состава пылеугольного топлива, вдуваемого в горн доменных печей ПрАО «Донецксталь» - металлургический завод» // *Научные труды ДонНТУ. Металлургия*. – 2011. – № 13. – С. 44-53.
3. Аносов В.Г., Лантев Д.А. Исследование процесса горения пылеугольного топлива в фурменной зоне доменной печи // *Металлургия*. – Запорожье, 2011. – № 23. – С. 16-30.
4. Приходько Ю. А. Разработка технологии подачи, сжигания и использования пылеугольного топлива в доменном процессе // *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. – Днепропетровск. – 1984. – 147 с.
5. Хаджинов Е.А. Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 11. – С. 9-13.
6. *Металлургия чугуна: учебник для вузов*/ Под редакцией Ю.С. Юсфин. –М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774с.
7. *Основы практической теории горения* / под. ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
8. Калинин В.В., Зинченко Ю.А., Черненко А.С. Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами // *Металл и литье*. – 2013. – № 11.
9. Калинин В.В., Зуй О.Н., Орловская С.Г. Влияние температуры и диаметра пористых углеродных частиц на кинетику химических реакций и теплообмен с воздухом // *Теплофизика высоких температур*. – 2005. – Т.43, №5. – С.780-788.

10. Чайка А.Л. Аналитическое исследование и совершенствование процессов в фурменной зоне доменной печи // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск – 2003.– 162 с.
11. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740с.
12. Металлургическая теплотехника: учебник / под ред. В. А. Кривандин. – М.: Металлургия, 1986. – Т. 1. – 423 с.

Калінчак В. В., Зінченко Ю.О., Черненко О. С., Куземко Р. Д.

Вплив початкових параметрів газу та частинок пиловугільного палива на характеристики їх горіння в фурменому вогнищі

АНОТАЦІЯ

Проведено моделювання горіння коксових частинок у фурменому вогнищі з урахуванням стефанівської течії, кінетики гетерогенних реакцій окислення і газифікації вуглецю, гомогенної реакції окислення чадного газу, турбулентного тепломасопереносу і теплового випромінювання. Вугільний пил вдувається в потоці розігрітого до високої температури повітря, збагаченого киснем. В результаті отримано залежності, що дозволяють судити про ступінь впливу масової витрати вугільного пилу, дисперсності пилу, температури і масової частки кисню повітряного дуття на механічну повноту згорання частинок, довжину кисневої зони і газовий склад. При виборі оптимального співвідношення між діаметром і масовою витратою частинок слід орієнтуватися на коефіцієнт надлишку кисню в суміші 1.1-1.2.

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

Influence of initial parameters of gas and pulverized coal particles on burning characteristics in tuyere hearth

SUMMARY

Combustion of coke particles in the tuyere hearth is modeled taking into account Stephan flow, kinetics of oxidation and carbon gasification reactions, homogeneous oxidation reaction of carbon monoxide, turbulent heat and mass transfer and radiation heat transfer. Coal dust is blown by flow of hot oxygen-enriched air. Dependences are obtained, which allow to estimate the effect of coal dust mass concentration, coal particle size, temperature and mass fraction of oxygen in the air on mechanical burn-out, oxygen zone length and the gas composition. When choosing the optimum ratio between the particles diameter and the mass flow rate should be guided by a factor of excess oxygen in the feed mixture equal to 1.1-1.2.