

В. В. Калинчак, Ю. А. Зинченко*, А. С. Черненко, Р. Д. Куземко**

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, Одесса

*ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», группа Метинвест, Мариуполь

**Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

Оценка доли выгорания частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге

Используя физико-математическую модель высокотемпературного теплообмена и окисления пылеугольного топлива в фурменном очаге, приводится оценка влияния начальной концентрации кислорода, температуры и скорости дутья, дисперсности и массового расхода угольной пыли на полноту сгорания пыли плотных частиц кокса, температуру и состав газа по длине фурменного очага.

Ключевые слова: фурменный очаг, пылеугольное топливо, частица, теплообмен, полнота сгорания, дисперсность

Введение. Главными показателями эффективности использования углей в качестве пылеугольного топлива (ПУТ) является полнота их сгорания и полная газификация угольных частиц в пределах фурменных зон доменной печи до угарного газа [1-6]. Неполнота сгорания ПУТ, особенно при больших расходах, обуславливает снижение коэффициента замены кокса и повышение содержания углерода в продуктах плавки.

Большим преимуществом пылевидного угля по сравнению с другими видами топлива является его низкая стоимость. При вдувании измельченного угля затраты тепла на процессы термического его разложения небольшие, что обеспечивает сравнительно высокий (особенно к природному и коксовому газам) приход тепла в горн доменной печи. Для достижения оптимальных показателей при вдувании ПУТ обычно варьируют эмпирическим путем дисперсность и массовый расход угольной пыли, температуру и скорость вдуваемого воздуха, концентрацию кислорода [2-4].

Цель настоящей работы – изучение процессов теплообмена и горения частиц ПУТ в фурменном очаге, проведение анализа влияния начальных параметров, а именно размера частиц ПУТ, температуры дутья, массовой доли кислорода и массового расхода пылеугольного топлива.

Постановка задачи. Рассмотрим фурму доменной печи (рис. 1). Угольная пыль вдувается в потоке разогретого до высокой температуры воздуха, обогащенного кислородом. Подают пылеугольное топливо (ПУТ) и воздух отдельно. На некотором расстоянии (около 0,4 м) от выходного отверстия фурмы происходит интенсивное перемешивание этих двух потоков. После чего образующая смесь попадает в фурменный очаг, где происходит сжигание ПУТ и кислорода дутья.

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

В качестве ПУТ рекомендуются угли и концентрации с содержанием золы и серы до 10-12 и 1,5-2,0 % соответственно. Влажность в дутье не должна превышать 10-12 %. Диаметр частиц δ_b , подаваемых в ПУТ варьируется от 30 до 200 мкм. Массовый расход пылеугольного топлива на фурму $m = 10-25$ кг/мин. Внутренний диаметр трубы, из которой истекает азот с угольным порошком, составляет 20 мм.

Степень обогащения дутьевого воздуха Z_{O_2b} , проходящего через сопло, обычно меняется от 21 до 38 %. Расход воздуха на одну фурму $V_1 = 225$ м³/мин (на 20 фурм – 4500 м³/мин). Температура воздуха T_{1b} , поступающая через сопло дутьевой фурмы за счет предварительного разогрева, варьируется в пределах 900-1400 °С. Диаметр сопла фурмы $2r_{sb} = 160$ мм.

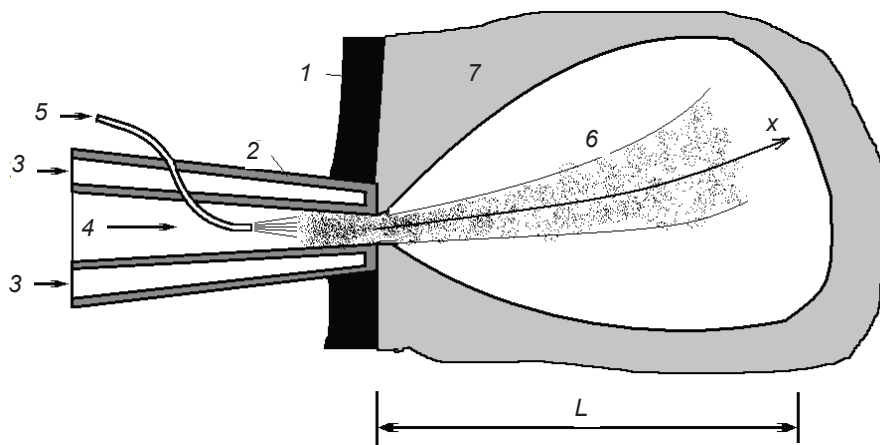


Рис. 1. Фурменная зона доменной печи: 1 – огнеупорная стенка доменной печи, 2 – водоохлаждаемая фурма, 3 – подача воды для охлаждения фурмы, 4 – подача обогащенного кислородом воздуха, 5 – подача угольного порошка в потоке азота, 6 – фурменный очаг, 7 – пространство, занятое коксом, железной рудой

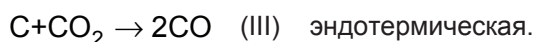
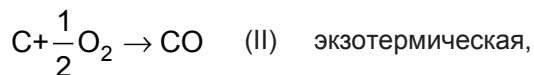
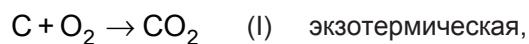
Таким образом, скорость истечения смеси на выходе из сопла фурмы $w_{1b} = 200-290$ м/с. Частицы угля подхватываются потоком обогащенного воздуха и разгоняются практически до скорости газа. Движение газа и частиц турбулентное, так как число Рейнольдса на входе в фурменный очаг около 10^5 . Поэтому рассматриваемые величины считаем средними для данного сечения.

Длина фурменного очага $L = 2,0-2,2$ м. Давление в доменной печи в районе фурменного очага $P = 0,36-0,56$ МПа.

Параметры газа вне факела считаем заданными: скорость $w_{1\infty} = 0$, 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.

Кинетика химических реакций. Примем, что частицы являются коксовыми (отсутствие летучих), плотными (отсутствие пористости) и сферическими. На поверхности такой угольной частицы протекают три реакции:



В газе между частицами топлива протекает и гомогенная реакция



Зададим скорости химических реакций по кислороду (масса кислорода, вступающего в реакцию на единице внешней поверхности в единицу времени):

$$w_{O_2(I)} = k_1 \rho_1 Z_{O_2 s}; \quad w_{O_2(II)} = k_2 \rho_1 Z_{O_2 s}$$

и по углекислому газу

$$w_{CO_2(III)} = k_3 \rho_1 Z_{CO_2 s}.$$

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

$$w_{CO(IV)} = \begin{cases} k_4 \rho_1 Z_{CO}, & Z_{O_2} \geq 0,05\% \\ k_4 \rho_1 Z_{CO} \frac{Z_{O_2}}{0,05}, & Z_{O_2} < 0,05\% \end{cases}$$

Связь между скоростями химических реакций по другим компонентам:

$$w_{CO_2(I)} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} w_{O_2(I)}; \quad w_{C(I)} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} w_{O_2(I)};$$

$$w_{CO(II)} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} w_{O_2(II)}; \quad w_{C(II)} = \frac{2\mu_C}{\mu_{O_2}} w_{O_2(II)};$$

$$w_{CO(III)} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{CO_2}} w_{CO_2(III)}; \quad w_{C(III)} = \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} w_{CO_2(III)};$$

$$w_{CO_2(IV)} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CO}} w_{CO(IV)}; \quad w_{O_2(IV)} = \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} w_{CO(IV)}.$$

Здесь μ_j – молярные массы, кг/кмоль, k_i – константы химических реакций

$$k_i = k_{0i} \exp\left(-\frac{E_i}{\mu R T}\right),$$

где $\mu R = 8,31$ – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К).

Кинетические константы гетерогенных реакций (в м/с) определяются по энергии активации первой реакции (например, для антрацита $E_1 = 140$ МДж/кмоль) [7].

$$k_{0i} = 100 \exp\left(\frac{E_i}{\mu R \cdot 2600}\right), \quad \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{2C+O_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO}} = 1,1,$$

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{E_{C+CO_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO}} = 2,2.$$

$Q_1 = 12,343$ МДж/кг O_2 , $Q_2 = 6,844$ МДж/кг O_2 ; $Q_3 = 4$ МДж/кг CO_2 .

Для гомогенной реакции: $E_4 = 96,3$ МДж/кмоль, $k_{04} = 7,05 \cdot 10^6$ 1/с, $Q_4 = 20,39$ кДж/кг CO_2 .

Физико-математическая модель теплообмена частицы ПУТ. Изменение температуры частицы происходит за счет тепловыделения и теплопоглощения q_{ch} в гетерогенных химических реакциях (I)-(III), теплообмена с окружающим газом q_g за счет молекулярной и турбулентной диффузии с учетом стефановского течения, направленного от частицы, а также теплообмена излучением q_w со стенками шихты согласно уравнению:

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

$$q_{ch} = \left(\begin{matrix} (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_{1s} Z_{O_2 s} - \\ - Q_3 k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2 s} \end{matrix} \right) (1 - A_p),$$

$$q_g = \frac{\lambda_1 Nu}{\delta} (T_2 - T_1) + U_{s0} \rho_1 c_1 T_*, \quad q_w = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_3^4),$$

$$T_* = 0,5(T_1 + T_2), \quad \varepsilon = \varepsilon_0 (1 - \exp(-l/r_s)),$$

$$l \sim \delta \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) (B^{-1} - 1), \quad B = \frac{\dot{m}}{\dot{m} + V_1 \rho_1},$$

где A_p – зольность угля в %, r_s – характерный размер струи (возьмем радиус струи); l – длина свободного пробега излучения, ε_0 – коэффициент черноты поверхности частицы; T_3 – температура стенок фурменного очага, B – относительная массовая концентрация топлива, \dot{m} – массовый расход угольного топлива, кг/с.

Концентрации кислорода и углекислого газа у поверхности плотной частицы ПУТ определяются согласно выражениям [8]:

$$Z_{O_2s} = \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + U_{s0}} Z_{O_2},$$

$$Z_{CO_2s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \left(\frac{k_1}{\beta + U_{s0} + k_3} \right) Z_{O_2s} + \frac{\beta}{(\beta + U_{s0} + k_3)} Z_{CO_2},$$

$$U_{s0} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} \left(k_1 + 2k_2 + \frac{k_3 k_1}{\beta + k_3} \right) \left(\frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2} \right) Z_{O_2} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \frac{\beta}{\beta + k_3} Z_{CO_2},$$

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

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

$$Nu = 2 + 0,16 Re_2^{2/3}, \quad Re_2 = \frac{|w_1 - w_2| \delta}{v_{1m}}.$$

Теплофизические свойства газа, которые необходимо определять, это коэффициент теплопроводности смеси λ_1 и коэффициент диффузии газообразных веществ D_1 , в газовой смеси. 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:

$$v_{1m} = v_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{2,5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T_0 + C}{T + C} \right),$$

$$\lambda_{1m} = \lambda_{10} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{1,5} \left(\frac{T_0 + C}{T + C} \right),$$

$$D_{O_2m} \approx D_{CO_2m} \approx D_{COm} \approx D_{1m} \approx v_{1m} Pr,$$

$$\rho_1 = \rho_{10} \frac{T_0}{T_1} \frac{P}{P_0},$$

турбулентные (для чисел $Re_1 < 10^5$) [9]:

$$D_{1t} \approx 18 \cdot 10^{-3} w_1 r_s Re_1^{-0,16} \frac{P_0}{P}, \quad \lambda_{1t} = D_{1t} c_1 \rho_1$$

Уравнение для уменьшения размера частицы легко получается из определения скорости гетерогенной реакции w_c . Таким образом, в процессе трех гетерогенных реакций диаметр уменьшается согласно уравнению:

$$-\frac{1}{2} \rho_2 w_2 \frac{\partial \delta}{\partial x} = w_c, \quad \delta(x=0) = \delta_b, \quad (2)$$

$$w_c = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \rho_{1s} Z_{O_2s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2s}.$$

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 масса частицы ПУТ, ρ_2 – плотность угольной частицы. В дальнейшем предполагаем, что число частиц в процессе движения в факеле, проходящее через любое сечение за единицу времени, остается постоянным.

Изменение средней температуры газа в единичном объеме смеси осуществляется за счет нагрева гомогенной экзотермической реакцией (IV), нагрева углеродными частицами и теплоотдачей в окружающую газовую среду через боковую поверхность факела:

$$c_1 \rho_1 w_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = Q_4 w_{CO(IV)} + q_g \frac{S_c}{S(1-\eta)} \frac{\dot{N}}{w_1} - q_{gaz} \frac{p_s}{S(1-\eta)}, \quad T_1(x=0) = T_{1b}, \quad (3)$$

$$q_{gaz} = \alpha_g (T_1 - T_{1\infty}), \quad \alpha_g = \frac{Nu_g \lambda_1}{2r_s}, \quad \eta = \frac{\pi}{6} \delta^3 \frac{\dot{N}}{u_1 S}.$$

Здесь $S = \pi r_s^2$ – площадь поперечного сечения факела; $S_c = \pi \delta_c^2$ – внешняя поверхность углеродной частицы, q_{gaz} – тепловой поток через боковую поверхность факела к внешнему газу, p_s – периметр осевого сечения, η – доля объема смеси, занимаемой частицами ПУТ, Nu_g – число Нуссельта, рассчитанное при температуре газа, α_g – коэффициент теплообмена горящего факела с окружающим газом.

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

$$-\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{O_2}}{\partial x} = w_{O_2(IV)} + j_{O_2s} \frac{S_c}{S(1-\eta)} \frac{\dot{N}}{w_1} + j_{O_2gaz} \frac{p_s}{S(1-\eta)}, \quad Z_{O_2}(x=0) = Z_{O_2b} \quad (4)$$

$$j_{O_2s} = w_{O_2} = w_{O_2(I)} + w_{O_2(II)} = (k_1 + k_2) \rho_{gs} Z_{O_2s}.$$

Аналогичным образом строятся уравнения для изменения относительных концентраций углекислого и угарного газов:

$$\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{CO_2}}{\partial x} = w_{CO_2(IV)} + j_{CO_2s} \frac{S_c}{S(1-\eta)} \frac{\dot{N}}{w_1} - j_{CO_2gaz} \frac{p_s}{S(1-\eta)}, \quad Z_{CO_2}(x=0) = Z_{CO_2b}; \quad (5)$$

$$\rho_1 w_1 \frac{\partial Z_{CO}}{\partial x} = -w_{CO(IV)} + j_{COs} \frac{S_c}{S(1-\eta)} \frac{\dot{N}}{w_1} - j_{COgaz} \frac{p_s}{S(1-\eta)}, \quad Z_{CO}(x=0) = Z_{COb}. \quad (6)$$

$$j_{CO_2s} = w_{CO_2} = w_{CO_2(I)} - w_{CO_2(III)} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_1 \rho_{1s} Z_{O_2s} - k_3 \rho_{1s} Z_{NO_2s},$$

$$j_{COs} = w_{CO} = w_{CO(II)} + w_{CO(III)} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_2 \rho_{1s} Z_{O_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{NO_2}} k_3 \rho_{1s} Z_{NO_2s}.$$

Массовые потоки из факела в окружающий газ

$$j_{O_2gaz} = \beta_g \rho_1 (Z_{O_2} - Z_{O_2\infty}),$$

$$j_{CO_2gaz} = \beta_g \rho_1 (Z_{CO_2} - Z_{CO_2\infty}),$$

$$j_{COgaz} = \beta_g \rho_1 (Z_{CO} - Z_{CO\infty}), \quad \beta_g = \frac{Nu_g D_1}{2r_s}.$$

Здесь j_{O_2s} , j_{CO_2s} , j_{COs} – плотность массового потока компонента к поверхности частицы, j_{O_2gaz} , j_{CO_2gaz} , j_{COgaz} – плотность массового потока компонента во внешнюю газовую среду, β_g – коэффициент массообмена горящего факела с окружающим газом.

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

$$w_1 = \begin{cases} w_{1b} & \text{при } x < 11,17 \frac{P_0}{P} r_{sb}, \\ 0,96 w_{1b} \left(0,06 \frac{x}{r_{sb}} \frac{P}{P_0} + 0,29 \right)^{-1} & \\ \text{при } x^3 \geq 11,17 \frac{P_0}{P} r_{sb}, & \end{cases}$$

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

Тогда изменение скорости газа по срезу сопла определяется в виде

$$\frac{\partial w_1}{\partial x} = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 11,17 \frac{P_0}{P} r_{sb}, \\ -\frac{w_1^2}{w_{1b}} \frac{P}{P_0} \frac{1}{16r_{sb}} & \text{при } x \geq 11,17 \frac{P_0}{P} r_{sb}, \end{cases} \quad (7)$$

Ввиду того, что частицы ПУТ малы, то с достаточной точностью можно принять равенство средних скоростей движения частиц и газа.

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

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

Откуда нетрудно получить уравнение для изменения площади осевого сечения факела:

$$\rho_1 w_1^2 \frac{\partial S}{\partial x} = w_c S_c \dot{N} - w_1^2 S \frac{\partial \rho_1}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial x} - S \rho_1 w_1 \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad S(x=0) = S_b. \quad (8)$$

Здесь S_b – площадь среза сопла фурмы.

Полученная система дифференциальных уравнений (1)-(8) позволяет в дальнейшем произвести анализ влияния различных факторов на степень выгорания углеродных частиц и массовый выход угарного газа.

Расчеты, для примера, проводились для кокса антрацита марки АШ при следующих параметрах: $E_1 = 140$ МДж/кмоль, $A_p = 0$ %. Постоянные: $v_{10} = 13,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho_{10} = 1,293$ кг/м³; $\lambda_{10} = 8,19 \times 10^{-2}$ Вт/(м·К); $c_{10} = 1110$ Дж/(кг·К); $T_0 = 1273$ К; $c_2 = 947$ Дж/(кг·К); $r_{2b} = 1440$ кг/м³; $\varepsilon = 0,78$; $n = 0,75$.

Анализ профилей вдоль фурменного очага. Рассмотрим характерные профили температур, диаметра и концентраций газообразных компонентов (рис. 2). При расчетах использовали, что вне струи свойства постоянны и равны характерным значениям в фурменном очаге [3, 4]: $T_{1\infty} = T_3 = 1600$ К, $Z_{O_2\infty} = 0$, $Z_{CO_2\infty} = 0$, $Z_{CO\infty} = 0,45$.

На начальном этапе (кислородная зона), когда основным окислителем является кислород, интенсивно протекают экзотермические гетерогенные реакции (I) и (II), а также гомогенная реакция (IV). Естественно, что температура частицы и газа, которые слабо отличаются друг от друга, начинают возрастать. При этом скорость уменьшения диаметра частицы резко возрастает. Угарный газ, который образуется в гетерогенной реакции (II), в дальнейшем практически полностью реагирует с кислородом в гомогенной реакции

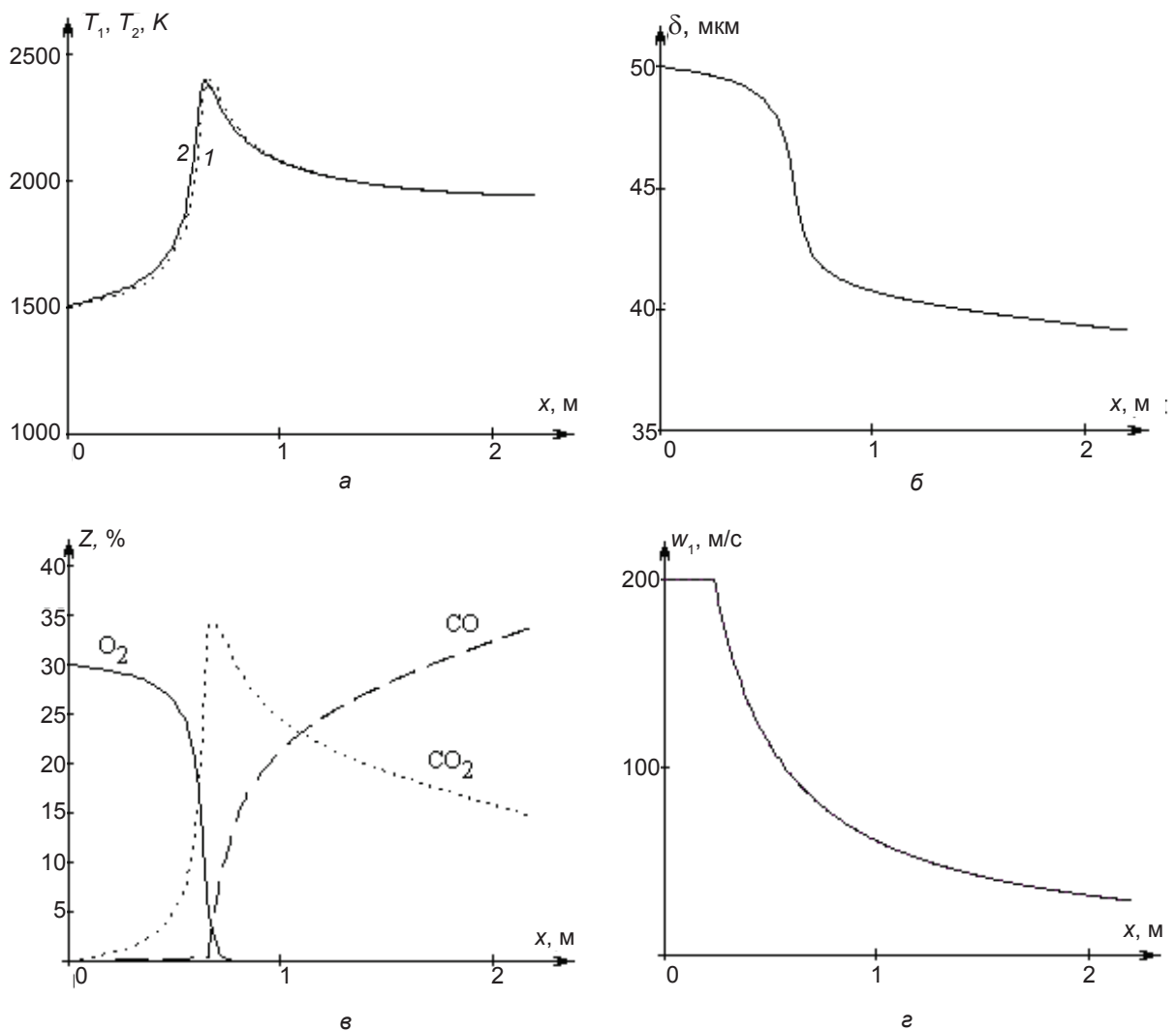


Рис. 2. Изменение с координатой температур частиц (2) и газа (1) (а), диаметра частицы (б), концентраций компонентов в газе (в), скорости потока (г) при $T_{1b} = T_{2b} = 1500 \text{ K}$, $\delta_b = 50 \text{ мкм}$, $\dot{m} = 20 \text{ кг/мин}$, $V_1 = 225 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Z_{O_2} = 30 \%$

(IV). Поэтому в кислородной зоне фурменного очага отсутствует угарный газ, а содержание углекислого газа быстро возрастает. Образование окиси и двуокиси в гетерогенных реакциях (I) и (II) соизмеримо.

При достижении частиц ПУТ определенной температуры роль эндотермической реакции возрастает. Дополнительно это связано и с исчезновением кислорода в газе. В результате начинает уменьшаться температура частиц и газа. Максимальная температура частиц соответствует и максимальному содержанию углекислого газа в газе. Дальнейшее уменьшение размера частицы происходит за счет гетерогенной реакции (III). Содержание угарного газа начинает возрастать и достигает обычно необходимого уровня в 30-45 %. Содержание углекислого газа монотонно уменьшается. Данная зона носит название углекислородной. За счет турбулентности движения газа и частиц, и как следствие большой скорости массопереноса, режим окисления мелких частиц определяется кинетикой реакций.

В качестве анализируемых величин в дальнейшем выбирались: максимальная температура частиц и газа T_{max} , диаметр частицы в конце фурменного очага δ_L (на расстоянии $L = 2,2 \text{ м}$ от среза сопла фур-

мы) для оценки полноты сгорания φ , массовая доля угарного газа в конце фурменного очага $Z_{CO,L}$, а также размеры окислительной зоны L_{ok} ($Z_{O_2} < 0,1 \%$).

Влияние факторов на полноту сгорания и размеры зоны горения. Количество углерода ПУТ, сгорающего в горне, и продуктов сгорания, образующихся в единицу времени, строго пропорционально количеству вдуваемого кислорода. В каких бы пределах не изменялось количество дутья, весь кислород будет израсходован с образованием оксида углерода. 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. От размеров зоны горения существенно зависит работа доменной печи. При ее уменьшении нарушается равномерность схода шихты, распределение газов и скорость движения материалов по сечению печи. Сокращение глубины зоны горения, как правило, приводит к загромождению осевой зоны горна. Вместе с тем, чрезмерное увеличение зоны горения также нежелательно, поскольку вызывает повторное интенсивное окисление железа и других элементов, входящих в состав чугуна.

Дисперсность угольных частиц. В связи с тем, что процесс горения совершается на поверхности, количество углерода, сгорающего в единице объема окислительной зоны, зависит от величины поверхности частиц ПУТ и пор, доступных для проникновения газов. Чем мельче частицы угля и чем больше в них пор, тем поверхность более реакционная, и горение будет протекать более интенсивно. Поэтому применение мелких и пористых угольных частиц ПУТ будет способствовать уменьшению зоны горения и увеличивать полноту сгорания таких частиц (табл. 1-3). В данной работе, как было указано ранее, оценка проводится для безпористых частиц. Поэтому реальная полнота выгорания пористых частиц может отличаться от расчетной. В среднем при пролете плотной частицы ПУТ от среза сопла фурмы до задней стенки фурменного очага ее доля выгорания составляет более 50 %, что уже достаточно хорошо.

Температура дутья. В зависимости от условий работы печи температура дутья может по-разному

влиять на размеры зоны горения. При относительно низком нагреве дутья (1200 К) или при похолодании горна повышение температуры дутья вызывает увеличение скорости сгорания углерода, что отражается на объеме, в котором совершается процесс горения, а не на количестве сжигаемого углерода в единицу времени (оно строго соответствует количеству поступающего кислорода). Поэтому повышение температуры дутья всегда вызывает сокращение окислительной зоны (табл. 1). Увеличение начальной температуры газа приводит к небольшому возрастанию максимальной температуры горения. Полнота сгорания частиц также монотонно увеличивается. Следует обратить внимание на наличие критического значения температуры газа, зависящее от размера частиц, ниже которого внутри пылеугольного потока не происходит интенсивного тепломассообмена и химического реагирования. С увеличением размера частиц критическое значение температуры газа также увеличивается.

Таблица 1

Влияние температуры дутья $w_1 = 200$ м/с, $\dot{m} = 20$ кг/мин, $Z_{O_2b} = 30$ %, $V_1 = 225$ м³/мин

$T_{1b} = T_{2b}$, К	$\delta_b = 50$ мкм					$\delta_b = 100$ мкм				
	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %
1300	38,3	55,1	2335	1,56	26,7	—	—	—	—	—
1400	37,6	57,5	2370	1,12	29,6	77,7	53,1	2340	1,59	17,9
1500	37,1	59,1	2410	0,83	31,6	76,7	54,9	2380	1,20	20,8
1600	36,8	60,1	2445	0,64	32,8	75,9	56,3	2410	0,96	22,5
1700	36,6	60,8	2490	0,52	33,9	75,3	57,3	2470	0,80	23,9

Таблица 2

Влияние содержания кислорода в дутье $T_{1b} = T_{2b} = 1500$ К, $w_1 = 200$ м/с, $\dot{m} = 20$ кг/мин, $V_1 = 225$ м³/мин

Z_{O_2b} , %	$\delta_b = 50$ мкм					$\delta_b = 100$ мкм				
	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %
23	39,3	51,4	2310	0,99	25,6	80,9	47,1	2275	1,42	15,5
26	38,3	55,1	2345	0,91	28,4	79,0	50,7	2315	1,31	18,0
29	37,5	57,8	2390	0,85	30,8	77,2	54,0	2355	1,23	20,2
32	36,6	60,8	2430	0,80	32,8	75,5	57,0	2400	1,15	21,9
35	35,9	63,0	2465	0,75	34,7	73,8	59,8	2450	1,10	23,6
38	35,2	65,1	2505	0,71	36,3	72,3	62,2	2475	1,04	24,9

Таблица 3

Влияние массового расхода порошка ПУТ в дутье $T_{1b} = T_{2b} = 1500$ К, $w_1 = 200$ м/с, $\dot{m} = 20$ кг/мин, $V_1 = 225$ м³/мин

m , кг/мин	$\delta_b = 50$ мкм					$\delta_b = 100$ мкм				
	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %	δ_L , мкм	φ , %	T_{max} , К	L_{ok} , м	$Z_{CO,L}$, %
10	29,0	80,5	2425	1,12	25,7	61,5	76,7	2395	1,56	15,1
15	34,2	68,0	2415	0,95	28,8	71,0	64,2	2390	1,35	18,3
20	37,1	59,1	2410	0,83	31,6	76,7	54,9	2380	1,20	20,8
25	39,1	52,2	2400	0,76	3,8	80,2	48,4	2375	1,10	23,0

Массовая доля кислорода в дутье. При обогащении дутья кислородом на единицу вдуваемого в горн кислорода приходится меньше азота и соответственно уменьшается количество горновых газов при сжигании единицы горючего. Следовательно, выделяющееся при сгорании углерода тепло нагревает образующиеся газы до более высокой температуры, то есть возрастает максимальная температура сгорания и уменьшается зона горения (табл. 2). В то же время с ростом температуры газов увеличивается их объем, что должно увеличивать зону горения. Однако в данном случае этот фактор незначителен.

Уменьшение зоны горения (кислородной зоны) с ростом начальной концентрации кислорода способствует более раннему превращению углекислого газа в угарный. При этом относительная доля CO в конце пути частиц ПУТ возрастает.

Массовый расход пылеугольного топлива. Вдуваемого кислорода очень много при малых массовых расходах угольных частиц. Кислородная зона достаточно протяженная. Частицы интенсивно реагируют, что приводит к высокой полноте сгорания (табл. 3). Однако и углекислый газ в больших количествах начинает превращаться в CO также поздно. Таким образом, недостатком является образование малого количества угарного газа.

При высоких массовых расходах топлива кислорода уже не так много. Кислородная зона небольшая и концентрация угарного газа также возрастает. Недостаток – уменьшение полноты сгорания частиц ПУТ.

Отметим слабую зависимость максимальной температуры горения частиц от массовой доли частиц пылеугольного топлива.

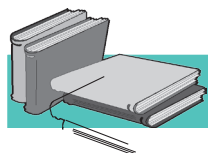
Адекватность построенной физико-математической модели тепломассообмена и горения частиц угольной пыли основана не только на согласовании характерных расчетных и экспериментальных профилей температуры и концентраций газов, но и газового состава по длине фурменного очага [3, 4].

Выводы

Построена физико-математическая модель высокотемпературного тепломассообмена и окисления пылеугольного топлива в фурменном очаге, позволяющая сделать оценки влияния начальных концентраций кислорода, температур и скорости дутья, дисперсности и массового расхода угольной пыли на полноту сгорания пыли, температуры и состава газа по длине фурменного очага. Полученные результаты качественно согласуются с характерными экспериментальными профилями.

Рост начальной температуры воздуха и содержания кислорода приводит к возрастанию полноты сгорания частиц пылеугольного топлива, содержанию угарного газа в продуктах сгорания и уменьшает кислородную зону.

Выбор массового расхода угольной пыли очень важен: при малых расходах высокая полнота сгорания частиц, но малое содержание угарного газа, при высоких – наоборот. Использование мелкодисперсного топлива позволяет за счет повышения удельной реакционной поверхности не только увеличить полноту сгорания топлива, но и уменьшить кислородную зону в фурменном очаге, что приводит к росту доли угарного газа в продуктах сгорания.



ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» / В. С. Бойко, С. А. Матвиенков, С. П. Ярошевский и др. // *Металл и литье*. – 2012. – № 2-3. – С. 7-11.
2. Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи № 1 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод / В. В. Кочура, С. П. Ярошевский, В. Е. Попов и др. // *Металл и литье*. – 2011. – № 9-10. – С. 11-15.
3. *Плискановский С. Т., Полтавец В. В.* Оборудование и эксплуатация доменных печей.: учебник. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 495 с.
4. *Металлургия чугуна: учебник для вузов / Под редакцией Ю. С. Юсфина.* – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
5. *Аносов В. Г., Лаптев Д. А.* Исследование процесса горения пылеугольного топлива в фурменной зоне доменной печи // *Металлургия*. – Запорожье, 2011. – Вып. 23. – С. 16-30.
6. *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.
7. *Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева.* Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
8. *Калинчук В. В., Зинченко Ю. А., Черненко А. С.* Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами // *Металл и литье*. – 2013. – № 11. – С. 14-25.
9. *Щетинков Е. С.* Физика горения газов. М.: Наука, 1965. – 740 с.
10. *Металлургическая теплотехника: учебник / под ред. В. А. Кривандина.* – М.: Металлургия, 1986. – Т. 1. – 423 с.

Анотація

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

Оцінка частки вигорання частинок пиловугільного палива у фурменому вогнищі

Використовуючи фізико-математичну модель високотемпературного тепломасообміну і окислення пиловугільного палива у фурменому вогнищі, приводиться оцінка впливу початкових концентрацій кисню, температури і швидкості дуття, дисперсності і масової витрати вугільного пилу на повноту згорання пилу щільних частинок коксу, температуру і склад газу по довжині фурменого вогнища.

Ключові слова

фурмене вогнище, пиловугільне паливо, частинка, тепломасообмін, повнота згорання, дисперсність

Summary

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

Estimation of the amount of burnup of particles of pulverized coal in the tuyere hearth

Estimation of the impact of the initial concentrations of oxygen, temperature and velocity of the blow and the dispersion and mass flow of coal dust on the completeness of combustion of dust of the dense coke particles, temperature and gas composition along the tuyere hearth is done on the base of the physical-mathematical model of high-temperature heat and mass exchange and oxidation of pulverized coal in tuyere hearth.

Keywords

tuyere hearth, pulverized coal, particle, heat and mass exchange, completeness of combustion, dispersion

Поступила 01.11.13

Вниманию авторов!

Все статьи, поступающие в редакции научных журналов «Металл и литье Украины» и «Процессы литья» должны обязательно проходить рецензирование, иметь УДК, фамилию, имя, отчество авторов, название статьи, аннотации, ключевые слова, на 3-х языках – русском, украинском и английском.

Объём статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Статьи в редакции должны поступать на бумажном и электронном носителях.

Для текстовых материалов желательно использовать формат doc.

Для графических материалов – формат jpeg.

Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах, графики и чертежи должны быть черно-белыми, чёткими и контрастными.

Фотографии и рисунки с разрешением, как минимум, 300 dpi.

Также необходимо прилагать контактную информацию (e-mail, телефон, адрес, факс) и сведения об авторах.