

**В. В. Калинин, Ю. А. Зинченко\*, А. С. Черненко, В. С. Волошин\*\*, 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

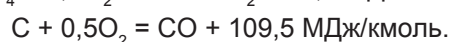
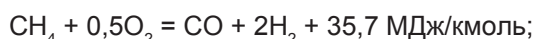
## Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами

*Проведен анализ скоростей параллельных химических реакций углерода с кислородом  $C + O_2 = CO_2$ ,  $2C + O_2 = 2CO$  и последовательной реакции углерода с диоксидом углерода  $C + CO_2 = 2CO$  при различных температурах и диаметрах углеродных частиц с учетом стефановского течения, интенсивности массообмена и внутреннего реагирования. Показана роль каждой из реакций и состав газообразных продуктов. В зависимости от диаметра углеродной частицы наблюдается максимум удельной скорости ее выгорания, который смещается в область более высоких температур при повышении интенсивности турбулентного массообмена.*

**Ключевые слова:** углерод, частица, удельная скорость выгорания, стефановское течение, массообмен, турбулентность

**В**ведение. Эффективность использования пылеугольного топлива вместо природного газа при производстве чугуна в доменных печах доказана мировой практикой. В 60-70-х годах прошлого столетия широкое использование природного газа не привело к радикальному сокращению кокса при производстве чугуна в доменных печах.

Основным недостатком использования природного газа, который в основном содержит метан в качестве доменного топлива, является малое количество теплоты, выделяющейся при горении метана до монооксида углерода в горне доменной печи (по сравнению с теплотой горения углерода кокса):



По этой причине использование природного газа, а не пылеугольного топлива, снижает теоретическую температуру горения.

Более 100 доменных печей металлургических комбинатов стран мира переведены на пылеугольное топливо. В металлургической отрасли Украины эту проблему можно отнести к проблеме № 1 национального масштаба [1-3]. В ближайшее время потребление угля на ММК им. Ильича приблизится к 1 млн. т/год. При таких масштабах потребления угля в одном цехе металлургического комбината важнейшей научно-технической задачей является правильное использование пылеугольного топлива в доменной плавке и полное его сжигание в пределах фурменного очага.

Согласно классическим представлениям образование монооксида и диоксида углерода происходит в результате параллельных химических реакций углерода с кислородом ( $C + O_2 = CO_2$  (I);  $2C + O_2 = 2CO$  (II)) и последовательной реакции углерода с диоксидом углерода ( $C + CO_2 = 2CO$  (III)) [4].

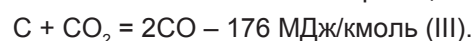
В металлургии при рассмотрении горения частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге [5-7]

обычно выделяют кислородную и углекислотную зоны. Необоснованно предполагают, что:

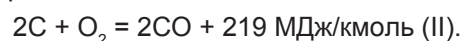
– в кислородной зоне протекает только одна экзотермическая реакция окисления



– в углекислотной зоне протекает лишь одна эндотермическая восстановительная реакция



При этом в кислородной зоне совсем не рассмотрена роль параллельной гетерогенной экзотермической реакции



Таким образом, выделяемое тепло при сгорании моля углерода остается таким же, однако скорость газификации углерода будет различной в зависимости от схемы реакций, размера частиц, температуры, давления, концентрации газообразных веществ.

Энергия активации реакции (II) немного больше энергии активации (I), что означает увеличение доли угарного газа с ростом температуры. Образованный угарный газ может реагировать с кислородом в газовой фазе по реакции



*Цель работы* – рассмотрение кинетики химических реакций и массообмена углеродных частиц с окружающим газом при высоких температурах в кислородной зоне фурменного очага; проведение анализа удельной массовой скорости выгорания углеродных частиц, скоростей образования угарного и углекислого газов, а также определение роли гетерогенных реакций при различных температурах и диаметрах частицы.

*Кинетика химических реакций и массообмен углеродной частицы.* При определении суммарной скорости химического преобразования углеродной частицы в результате химических реакций  $C + O_2 = CO_2$  (I);  $2C + O_2 = 2CO$  (II) и  $C + CO_2 = 2CO$  (III)

и плотности химического тепловыделения необходимо рассмотреть процессы, которые происходят на поверхности частицы и внутри нее на поверхности пор.

Скорость химической реакции по исходному компоненту ( $i$ ) или продукту реакции ( $j$ ) определяют уменьшением или увеличением соответственно массы исходного вещества либо продукта реакции, приходящегося на единицу внешней поверхности частицы, за единицу времени:

$$W_i = - \frac{1}{\pi\delta^2} \frac{\partial m_i}{\partial t}; W_j = - \frac{1}{\pi\delta^2} \frac{\partial m_j}{\partial t}.$$

Скорость реагирования углеродной частицы по кислороду и углероду вычисляют из выражений

$$W_{O_2} = - \frac{1}{\pi\delta^2} \frac{\partial m_{O_2}}{\partial t}; W_C = - \frac{1}{\pi\delta^2} \frac{\partial m_C}{\partial t}.$$

Связь между соответствующими скоростями по другим газообразным компонентам определяют из уравнений химических реакций на основе закона сохранения массы:

$$(W_C)_I = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (W_{O_2})_I; (W_C)_{II} = \frac{2\mu_C}{\mu_{O_2}} (W_{O_2})_{II};$$

$$(W_{CO_2})_I = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} (W_{O_2})_I; (W_{CO})_{II} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} (W_{O_2})_{II};$$

$$(W_C)_{III} = \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} (W_{CO_2})_{III}; (W_{CO})_{III} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{CO_2}} (W_{CO_2})_{III}.$$

Здесь  $\mu_C$ ,  $\mu_{O_2}$ ,  $\mu_{CO_2}$ ,  $\mu_{CO}$  – молярные массы углерода, кислорода, углекислого и угарного газов соответственно.

Согласно теории столкновений и закону действующих масс скорости гетерогенных химических реакций (I)-(III) пропорциональны концентрации газообразного вещества, находящегося в недостатке, и увеличиваются с ростом температуры по закону Аррениуса

$$(W_{O_2})_{I, s} = k_1 \rho_{1s} Z_{O_2, s}; (W_{O_2})_{II, s} = k_2 \rho_{1s} Z_{O_2, s};$$

$$(W_{CO_2})_{III, s} = k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2, s}; \quad (1)$$

$$k_i = k_{0i} \exp\left[-\frac{E_i}{\mu R T_2}\right]; \rho_{1s} = \rho_{10} \frac{T_0}{T_2} \frac{P}{P_0},$$

где  $(W_{O_2})_{I, s}$ ,  $(W_{O_2})_{II, s}$ ,  $(W_{CO_2})_{III, s}$  – скорости химических реакций по кислороду и углекислому газу в реакциях (I)-(III) на поверхности частицы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_{1s}$  – плотность газа на поверхности частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – константы скоростей химических реакции (I)-(III), м/с;  $k_{0i}$  – предэкспоненциальные множители констант скоростей химических реакций (I)-(III), м/с;  $E_i$  – энергия активации скоростей химических реакций (I)-(III), кДж/кмоль;  $T_2$  – температура частицы, К;  $Z_{O_2, s}$ ,  $Z_{CO_2, s}$  – относительные массовые концентрации кислорода и углекислого газа на поверхности частицы;  $P$  – давление газа, Па ( $P_0 = 0,1$  МПа);

$\mu R = 8,31$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К). Для различия температур, физических свойств газовой смеси и частицы использованы индексы: 1 – газ; 2 – частица.

При взаимодействии углерода коксовых частиц с кислородом в процессе хемосорбции образуются оксид и диоксид углерода. Атомы кислорода, находящиеся вблизи углеродной поверхности, адсорбируются на поверхности и удерживаются на ней за счет химических сил (механизм Ленгмюра). При этом происходит глубокое объединение атомов кислорода и углерода с образованием сложных гипотетических соединений типа  $C_xO_y$ . Уже при температурах выше 600-800 К сорбционные процессы протекают практически мгновенно, и механизм окисления приобретает ударный характер. Под ударами молекул кислорода комплекс  $C_xO_y$  распадается с выделением CO и CO<sub>2</sub> в определенных соотношениях между количествами обоих окислов, которые зависят от температуры, при которой протекает реакция.

Обработка экспериментальных данных по кинетике взаимодействия углерода с газами в полулогарифмических координатах Аррениуса показывает, что линии зависимости логарифма константы скорости реакции от обратной температуры по мере роста температуры сходятся в некоторой точке, которая называется полюсом [8]. Введение полюса позволяет связать между собой энергию активации  $E$  и предэкспоненциальный множитель  $k_0$ :

$$k_{0i} = k_* \exp\left[\frac{E_i}{\mu R T_*}\right].$$

Это дает возможность выразить константу скорости реакции, зная только энергию активации, через координаты полюса  $k_*$  и  $T_*$ :

$$k_i = k_* \exp\left[-\frac{E_i}{\mu R T} \left(1 - \frac{T_2}{T_*}\right)\right].$$

Одним из вариантов такого полюса может быть полюс, предложенный Шестаковым [7], с координатами:  $k_* = 100$  м/с и  $T_* = 2600$  К.

Исследование Вулиса и Померанцева [8] показывает, что между значениями энергии активации разных реакций углерода с O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> для одного и того же кокса существует определенная связь. На основании анализа многочисленных данных можно принять следующие соотношения между значениями энергии активации разных реакций

$$\frac{E_{2C+O_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 1,1; \frac{E_{C+CO_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 2,2.$$

Таким образом, зная энергию активации химической реакции углерода с кислородом, идущей с образованием углекислого газа, можно легко получить константы других реакций.

Химическая реакция (III) из-за большой энергии активации и относительно малой концентрации CO<sub>2</sub> на поверхности частицы вносит существенный вклад только при довольно высоких температурах. Ее влиянием внутри пор пренебрегают.

Суммарную скорость химического реагирования углеродной частицы по кислороду и углекислому газу можно представить как сумму скоростей реакций на внешней поверхности частицы и пор внутри нее:

$$W_{O_2} = (W_{O_2})_{l,s} + (W_{O_2})_{l,v} + (W_{O_2})_{ll,s} + (W_{O_2})_{ll,v};$$

$$W_{CO_2} = (W_{CO_2})_{l,s} + (W_{CO_2})_{l,v} - (W_{CO_2})_{ll,s} - (W_{CO_2})_{ll,v}.$$

Кинетику реакций внутри частицы определяют удельной поверхностью пор и средней концентрацией кислорода и углекислого газа по частице

$$(W_{O_2})_{l,v} = \frac{F_v \delta}{6} k_1 \rho_{1s} \langle Z_{O_2} \rangle_v; (W_{O_2})_{ll,v} = \frac{F_v \delta}{6} k_2 \rho_{1s} \langle Z_{O_2} \rangle_v; \quad (2)$$

$$(W_{CO_2})_{l,v} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \frac{F_v \delta}{6} k_1 \rho_{1s} \langle Z_{O_2} \rangle_v; (W_{CO_2})_{ll,v} = \frac{F_v \delta}{6} k_3 \rho_{1s} \langle Z_{CO_2} \rangle_v, \quad (3)$$

где  $F_v \delta / 6 = \sum_i N_i S_i / S$  – отношение поверхности всех пор к внешней поверхности частицы;  $N_i$  – число пор с поверхностью  $S_i$ ;  $F_v$  – удельная поверхность пор, то есть общая поверхность пор в единице объема частицы;  $\langle Z_{O_2} \rangle_v$ ,  $\langle Z_{CO_2} \rangle_v$  – средняя концентрация кислорода и углекислого газа по объему частицы.

Зависимость концентрации кислорода внутри частицы от радиальной координаты несложно найти из решения задачи диффузии при наличии химических реакций (I) и (II) внутри частицы

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \rho_{1s} D_v \frac{\partial Z_{O_2}}{\partial r} \right) - (k_1 + k_2) \rho_{1s} F_v Z_{O_2} = 0$$

с граничными условиями:  $r^2 \partial Z_{O_2} / \partial r |_{r=0} = 0$ ;  $Z_{O_2}(r = r_s) = Z_{O_2s}$ .

Решение можно представить в виде

$$Z_{O_2} = Z_{O_2s} \frac{r_s}{r} \frac{sh(Se_v(r/r_s))}{sh Se_v}; Se_v = \sqrt{(k_1 + k_2) r_s^2 F_v / D_v} = r_s / h; h = \sqrt{D_v / (k_1 + k_2) F_v}.$$

Среднее значение концентрации кислорода в объеме пор рассчитывают из условия полного реагирования кислорода, который проник вглубь частицы, а именно:

$$(W_{O_2})_{l,v} + (W_{O_2})_{ll,v} = D_v \rho_{1s} \partial Z_{O_2} / \partial r |_{r_s-0} = (k_1 + k_2) \rho_{1s} \frac{F_v \delta}{6} \langle Z_{O_2} \rangle_v,$$

откуда

$$\langle Z_{O_2} \rangle_v = Z_{O_2s} \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \frac{6}{F_v d}; k_v = D_v / r_s (Se_v cth Se_v - 1), \quad (4)$$

где  $k_v$  – эффективная константа внутреннего реагирования кислорода с углеродом; м/с;  $r$ ,  $r_s$  – радиальная координата и радиус внешней поверхности частицы, м;  $Se_v$  – внутренний критерий Семенова, определяющий отношение скорости реагирования кислорода внутри пор к его массопереносу;  $D_v$  – коэффициент внутренней диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $h$  – глубина реакционной зоны внутреннего реагирования, м;  $F_v$  – удельная поверхность пор, м<sup>-1</sup>.

Аналогичным образом вычисляют среднюю по объему относительную концентрацию углекислого газа из решения задачи диффузии при наличии химических реакций (I) и (III) внутри частицы

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \rho_{1s} D_v \frac{\partial Z_{CO_2}}{\partial r} \right) + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} F_v k_1 \rho_{1s} Z_{O_2} - F_v k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2} = 0$$

с граничными условиями:  $r^2 (\partial Z_{CO_2} / \partial r) |_{r=0} = 0$ ;  $Z_{CO_2}(r = r_s) = Z_{CO_2s}$ .

Решение данной задачи дает возможность определить профиль концентрации углекислого газа внутри частицы:

$$Z_{CO_2} = Z_{CO_2s} \frac{r_s}{r} \frac{sh(Se_{v3} r/r_s)}{sh(Se_{v3})} + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \frac{k_1 r_s^2 F_v}{D_v} \frac{r_s}{r} \left( \frac{sh(Se_v r/r_s)}{sh Se_v} - \frac{sh(Se_{v3} r/r_s)}{sh(Se_{v3})} \right) \frac{Z_{O_2s}}{(Se_{v3}^2 - Se_v^2)};$$

$$Se_{v3} = \sqrt{k_3 r_s^2 F_v / D_v}; h_3 = \sqrt{D_v / k_3 F_v}.$$

Среднее значение концентрации углекислого газа в объеме пор находят как

$$\langle Z_{CO_2} \rangle_v = 3 \int_0^{r_s} Z_{CO_2}(r) 4\pi r^2 dr / 4\pi r_s^3.$$

В результате получают

$$\langle Z_{CO_2} \rangle_v = Z_{CO_2, s} \frac{k_{v3}}{k_3} \frac{6}{F_v \delta} + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} a_{v3} \frac{6}{F_v d} Z_{O_2, s}; \quad (5)$$

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

Таким образом, с учетом (1), (2) и (4) суммарная скорость реагирования по кислороду приобретет вид

$$W_{O_2} = (k_1 + k_2) \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{1s} Z_{O_2, s}.$$

Суммарную скорость химического реагирования пористой углеродной частицы по углероду находят на основе формул (1)-(5):

$$W_C = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{1s} Z_{O_2, s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \left( 1 + \frac{k_{v3}}{k_3} \right) \rho_{1s} Z_{CO_2, s} + \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2, s}. \quad (6)$$

В то же время суммарную скорость химического реагирования углеродной частицы можно определить суммой скоростей химического реагирования на внешней поверхности и внутри пор:

$$W_C = - \frac{1}{\pi \delta^2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_2 \pi \delta^3}{6} \right) = - \frac{1}{2} \rho_2 \frac{\partial \delta}{\partial t} - \frac{1}{6} \delta \frac{\partial \rho_2}{\partial t} = W_{C, s} + W_{C, v}. \quad (7)$$

Первое слагаемое (6) учитывает реагирование на внешней поверхности углеродной частицы, которое приводит к уменьшению ее диаметра, а второе – внутреннее реагирование на поверхности пор, приводящее к уменьшению плотности частицы.

Уменьшение диаметра частицы обусловлено химическими реакциями (I)-(III) на ее внешней поверхности:

$$- \frac{1}{2} \rho_2 \frac{\partial \delta}{\partial t} = W_{C, s}; \quad \delta(t=0) = \delta_b;$$

$$W_{C, s} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} \left[ (W_{O_2})_{I, s} + 2(W_{O_2})_{II, s} \right] + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} (W_{CO_2})_{III, s};$$

$$W_{C, s} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \rho_{1s} Z_{O_2, s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_3 \rho_{1s} Z_{CO_2, s}.$$

Скорость химического преобразования углерода на поверхности пор в газообразные компоненты определяют как

$$W_{C, v} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} \left[ (W_{O_2})_{I, v} + 2(W_{O_2})_{II, v} \right] + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} (W_{CO_2})_{III, v}$$

или используя (2)-(5)

$$W_{C, v} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{1s} Z_{O_2, s} + \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2, s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} k_{v3} \rho_{1s} Z_{CO_2, s}.$$

Таким образом, уменьшение плотности частицы со временем происходит согласно закону

$$- \frac{1}{6} \delta \frac{\partial \rho_2}{\partial t} = W_{C, v}; \quad \rho_2(t=0) = \rho_{2b}.$$

Коэффициент внутренней диффузии и удельная поверхность пор выражаются через порозность частицы [8]:

$$D_v = m^2 D_{10} \left( \frac{T_2}{T_0} \right)^{n+1} \frac{P_0}{P}; \quad m = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_{real}}; \quad \frac{F_v}{F_{v0}} = \frac{m(1-m)}{m_b(1-m_b)} = \left( \frac{1 - \rho_2 / \rho_{real}}{1 - \rho_2 / \rho_{real}} \right) \frac{\rho_2}{\rho_{real}},$$

где  $D_{10}$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе при температуре  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с;  $m$  – порозность частицы;  $F_{v0}$  и  $m_0$  – начальная удельная поверхность пор и порозность;  $\rho_{real}$  – плотность сплошного вещества частицы.

Для определения поверхностных концентраций (индекс  $s$ ) через соответствующие значения в газе вдали от частицы (без индекса) необходимо рассмотреть задачу массопереноса в газовой фазе.

*Массоперенос в газе у поверхности частицы углерода.* С появлением на поверхности углеродной частицы новых масс газообразных продуктов химических реакций (I)-(III) возникает стефановское течение – дополнительный массовый и тепловой потоки, направленные от поверхности частицы. При химических реакциях на поверхности частицы потоки исходных веществ к поверхности и потоки продуктов реакций от поверхности связаны стехиометрическим соотношением. Общее давление и сумма относительных концентраций газообразных веществ остаются постоянными. Диффузионный поток азота к поверхности частицы уравновешивается переносом за счет стефановского течения от поверхности частицы, так как азот не принимает участие в реакциях. Стефановское течение увеличивает теплоотвод от частицы и уменьшает поток кислорода к поверхности частицы.

Для определения массовой скорости стефановского течения используют законы сохранения массы отдельного газообразного компонента у поверхности частицы. Масса, которая подводится или уносится от поверхности частицы за счет молекулярно-конвективного переноса и стефановским течением равна массе, исчезающей или появляющейся в результате гетерогенных химических реакций:

– кислорода

$$\beta_{O_2} \rho_1 (Z_{O_2} - Z_{O_2s}) - U_s \rho_g Z_{O_2s} = W_{O_2(I)} + W_{O_2(II)} = (k_1 + k_2 + k_v) \rho_{1s} Z_{O_2s};$$

– углекислого газа

$$\begin{aligned} & \beta_{CO_2} \rho_1 (Z_{CO_2} - Z_{CO_2s}) + U_s \rho_1 Z_{CO_2s} = W_{CO_2(I)} - W_{CO_2(III)} = \\ & = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_1 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{1s} Z_{O_2s} - (k_3 + k_{v3}) \rho_{1s} Z_{CO_2s} - \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2s}; \end{aligned}$$

– угарного газа

$$\begin{aligned} & \beta_{CO} \rho_1 (Z_{CO} - Z_{COs}) + U_s \rho_1 Z_{COs} = W_{CO(II)} + W_{CO(III)} = \\ & = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_2 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{1s} Z_{O_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \rho_{1s} Z_{CO_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2s}; \end{aligned}$$

– азота

$$\beta_{N_2} \rho_1 (Z_{N_2} - Z_{N_2s}) + U_s \rho_1 Z_{N_2s} = 0.$$

Далее используют условие постоянства давления на поверхности частицы, которое эквивалентно  $Z_{O_2} + Z_{CO_2} + Z_{CO} + Z_{N_2} = 1$ . Предполагают, что коэффициенты диффузии компонент газовой смеси равны  $D_1 = D_{O_2} = D_{CO_2} = D_{CO} = D_{N_2}$ . Это приводит к равенству коэффициентов массопереноса  $\beta = \beta_{O_2} = \beta_{CO_2} = \beta_{CO} = \beta_{N_2}$ , где  $\beta = D_1 \text{Nu} / \delta$  – коэффициент массопереноса кислорода к поверхности. В результате можно сделать вывод о том, что массовая скорость стефановского течения – скорость переноса твердой частицы в газообразные компоненты:

$$U_s \rho_1 = W_c = \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left[ 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{1s} Z_{O_2s} + \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \rho_{1s} Z_{CO_2s} + \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} k_3 a_{v3} \rho_{1s} Z_{O_2s}. \quad (8)$$

По (6) и (8) видно, что стефановское течение направлено от частицы и определяется суммарной скоростью реагирования углерода.

Подстановка скорости стефановского течения в законы сохранения массы газообразных компонентов дает возможность определить концентрации компонентов газа у поверхности частицы:

– кислорода  $O_2$

$$Z_{O_2s} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} Z_{O_2}; \quad (9)$$

– углекислого газа  $CO_2$

$$Z_{CO_2s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \left( \frac{k_1 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) - a_{v3} k_3}{\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3}} \right) Z_{O_2s} + \frac{\beta}{(\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3})} Z_{CO_2}; \quad (10)$$

– угарного газа CO

$$Z_{CO_s} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} \frac{k_2}{(\beta + U_{s0})} \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) Z_{O_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{CO_2}} \left(\frac{k_3 + k_{v3}}{\beta + U_{s0}}\right) Z_{CO_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} \frac{k_3 a_{v3}}{(\beta + U_{s0})} Z_{O_2s} + \frac{\beta}{\beta + U_{s0}} Z_{CO}; \quad (11)$$

– азота N<sub>2</sub>

$$Z_{N_2s} = \frac{\beta}{\beta + U_{s0}} (1 - Z_{O_2} - Z_{CO_2} - Z_{CO}). \quad (12)$$

Здесь  $U_{s0}$  – скорость стефановского течения, найденная приближенно при подстановке в (8) выражений для концентраций кислорода и углекислого газа без учета стефановского течения:

$$U_{s0} = \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} \left( (k_1 + 2k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) + k_3 a_{v3} \right) \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Z_{O_2} + \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \left( \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \frac{k_1 \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) - k_3 a_{v3}}{\beta + k_3 + k_{v3}} \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Z_{O_2} + \left( \frac{\beta}{\beta + k_3 + k_{v3}} \right) Z_{CO_2} \right).$$

Уравнение (9) можно также записать в виде

$$Z_{O_2s} = Z_{O_2} (1 + Se)^{-1}; \quad Se = Se_1 + Se_2 + Se_{sv} + Se_{sf}; \quad Se_1 = \frac{k_1}{\beta}; \quad Se_2 = \frac{k_2}{\beta}; \quad Se_{sv} = \frac{k_v}{\beta}; \quad Se_{sf} = \frac{U_{s0}}{\beta}.$$

Здесь  $Se$  – общий критерий Семенова, который показывает роль кинетики реакций на поверхности и внутри углеродной частицы стефановского течения относительно массопереноса окислителя в газе.

При  $Se \ll 1$  реакции протекают в кинетической области, концентрация кислорода на поверхности существенно отличается от ее значения в газе и не зависит от размера частицы. Концентрация кислорода на поверхности частицы при  $Se \gg 1$  (реакции протекают в диффузной области) уменьшается с ростом ее диаметра согласно зависимости

$$Z_{O_2s} = Z_{O_2} \frac{1}{Se} = Z_{O_2} \frac{D_1 Nu}{\delta(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})}.$$

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

$$Nu = 2 + 0,6 Pr^{1/3} Re_2^{1/2} \quad \text{или} \quad Nu = 2 + 0,16 Re_2^{2/3}; \quad Re_2 = \frac{|w_2 - w_1| \delta}{v_{1m}}.$$

Здесь  $w_1, w_2$  – скорости газового потока и частицы, м/с.

При турбулентном движении газа эффективные коэффициенты переноса определяют 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

$$D_{O_2m} \approx D_{CO_2m} \approx D_{COM} \approx D_{1m} = D_{10} (T_1/T_0)^{n+1} P_0/P; \quad v_{1m} = D_{1m} Pr;$$

$$\lambda_{1m} = \lambda_{10} (T_1/T_0)^n; \quad \rho_1 = \rho_{10} ((T_0/T_1)(P/P_0));$$

– турбулентные (для чисел  $Re < 105$ ) [9]

$$D_{1t} \approx 9 \cdot 10^{-3} w_1 \delta_0 Re_1^{-0,16} (P_0/P); \quad \lambda_{1t} = D_{1t} c_1 \rho_1; \quad Re_1 = w_1 \delta_0 / v_{1m}.$$

Здесь  $w_1$  – средняя скорость турбулентного потока, м/с;  $\delta_0$  – диаметр струи турбулентного потока, м;  $v_1$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $D_1$  – коэффициент диффузии газообразных веществ в газовой смеси, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности газа.

Режим окисления частицы зависит от роли массопереноса компонентов, поэтому дальнейший анализ

Таблица 1

**Влияние диаметра частицы на температуру, при которой становится существенной химическая реакция (III) при ее окислении в воздухе**

$\delta$ , мм	0,01	0,10	0,20	0,50	1,00	5,00	10,00
<b>T, K для неподвижной частицы</b>	2075	1725	1625	1525	1475	1325	1250
<b>T, K для частицы в тур- булентном потоке</b>	2650	2175	2050	1900	1775	1625	1550

будет проведен для случаев молекулярного (частица неподвижна) и турбулентного массопереноса ( $w_1 = 200$  м/с;  $\delta_0 = 150$  мм) в газе.

Анализ поверхностных концентраций газовых компонент при различных температурах и диаметрах частицы. Предложено рассмотреть влияние температуры частицы на поверхностные концентрации газообразных компонент и скорости реагирования углерода и кислорода, а также образования угарного и углекислого газов.

Качественное поведение температурных зависимостей поверхностных концентраций сходно для различных диаметров. С увеличением температуры концентрация кислорода монотонно уменьшается и приближается к нулевым значениям.

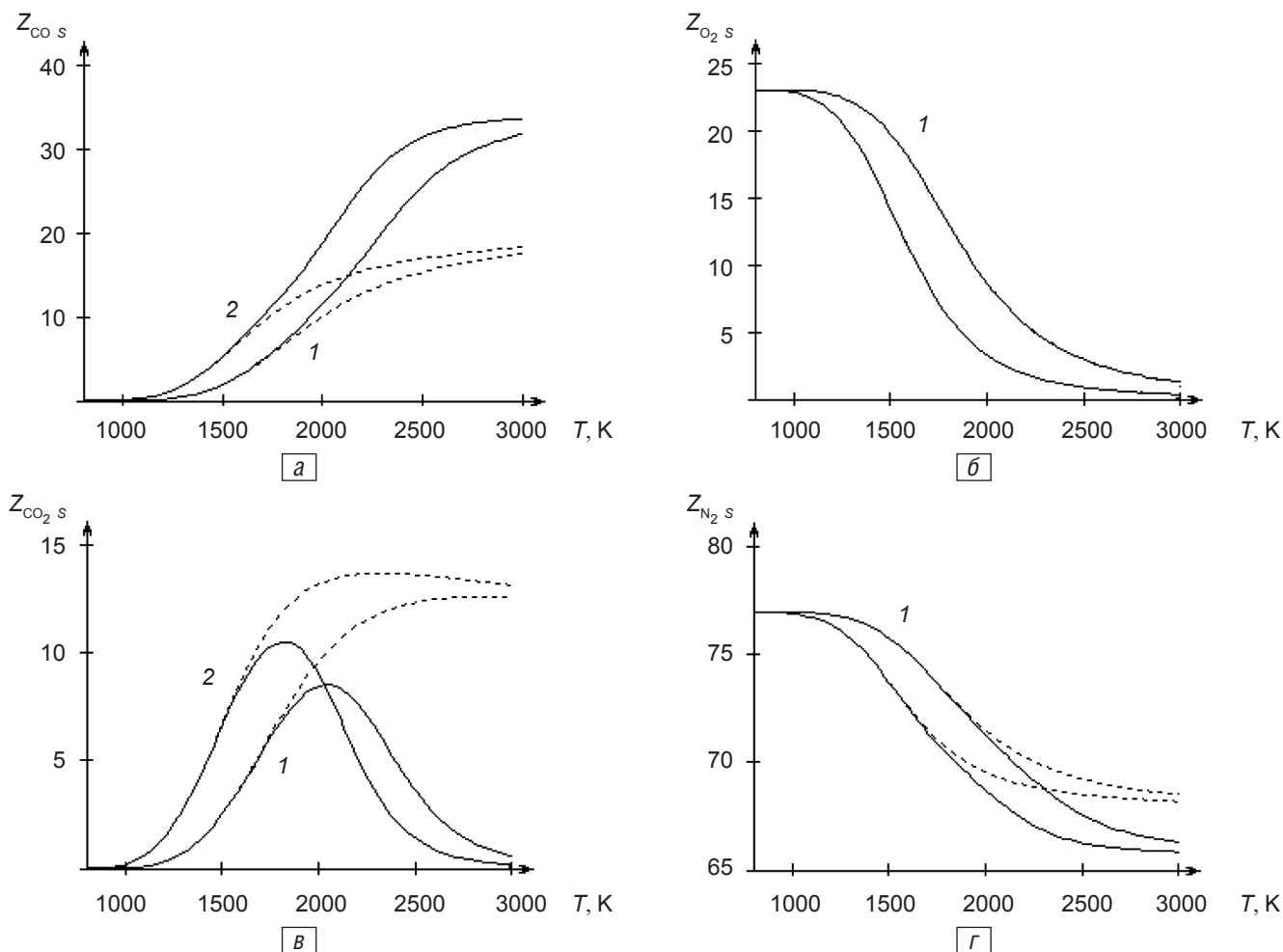
Расчеты проводили для частицы антрацита АШ при следующих параметрах:  $E_1 = 140,3$ , МДж/кмоль;  $F_{v_0} = 2 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup>;  $m = 0,1$ . Постоянные величины  $D_{10} = 3,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{10} = 0,277$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{10} = 0,0819$  Вт/(м·К) определяли для  $T_0 = 1273$  К;  $n = 0,75$ . Давление газовой смеси  $P = 0,1$  МПа.

При низких температурах преимущественно протекают основные реакции (I) и (II) (рис. 1). Поэтому с ростом температуры на поверхности частицы растет практически в равных пропорциях концентрация продуктов этих реакций – CO и CO<sub>2</sub>. При некоторой температуре, которая зависит от диаметра, стано-

вится существенной эндотермическая гетерогенная химическая реакция восстановления углекислого газа. Концентрация углекислого газа с ростом температуры начинает резко уменьшаться, а концентрация угарного газа – возрастать. Наступает преобладание угарного газа в продуктах реакции и даже при высоких температурах фактически полное отсутствие углекислого газа у поверхности частицы.

Температура, при которой становится существенной третья реакция, монотонно уменьшается с ростом диаметра (табл. 1). На это значение слабо влияют начальная концентрация кислорода, углекислого и угарного газов.

Таким образом, уже при температуре выше 2000 К для широкого диапазона размеров неподвижных частиц (в том числе и при движении в ламинарном



**Рис. 1.** Изменение концентраций: угарного газа (1) (а); кислорода (9) (б); углекислого газа (10) (в); азота (12) (г) у поверхности углеродной частицы кокса антрацита АШ от температуры частицы диаметром 1 – 50 мкм; 2 – 200 мкм; (9)-(12) – номера формул по тексту статьи; сплошная – учет реакций (I)-(III); пунктирная – учет реакций (I)-(II)

потоке), применяемых в качестве пылеугольного топлива при подаче в фурменный очаг ( $\delta > 10$  мкм), учет эндотермической гетерогенной реакции (III) необходим.

В процессе движения частицы в турбулентном потоке существенно увеличивается массообмен газа с приповерхностными слоями частицы. Качественное изменение температурных зависимостей концентраций компонентов с увеличением коэффициента диффузии сходно с уменьшением размера. Максимум на зависимости  $Z_{CO_2s}(T)$  смещается в область высоких температур. При температурах ниже 2000 К химические реакции протекают в кинетической области, что свидетельствует о малом отличии поверхностных концентраций компонентов от значений в газе вдали от частицы.

С ростом диаметра при заданной температуре частицы поверхностная концентрация кислорода падает, а концентрация углекислого газа возрастает монотонно более быстро, чем возрастает концентрация угарного газа. С повышением температуры за счет эндотермической реакции (III) на зависимости  $Z_{CO_2s}(\delta)$ , как и на зависимости  $Z_{CO_2s}(T)$ , наблюдается максимум, который с ростом температуры смещается в область меньших диаметров.

*Анализ скоростей гетерогенных реакций при различных температурах и диаметрах углеродной частицы.* Суммарную скорость химического реагирования пористой углеродной частицы определяют по формуле (4). Согласно имеющейся связи между скоростями по исходным веществам и продуктам реакций (I)-(III) скорость израсходования углеродного материала в каждой из реакций вычисляют по выражениям

$$(W_C)_I = (\mu_C/\mu_{O_2})(W_{O_2})_I = (\mu_C/\mu_{O_2})k_1[1 + k_v/(k_1 + k_2)]\rho_{1s}Z_{O_2};$$

$$(W_C)_{II} = (2\mu_C/\mu_{O_2})(W_{O_2})_{II} = (2\mu_C/\mu_{O_2})k_2[1 + k_v/(k_1 + k_2)]\rho_{1s}Z_{O_2};$$

$$(W_C)_{III} = \mu_C/\mu_{CO_2}(W_{CO_2})_{III} = (\mu_C/\mu_{CO_2})(k_3 + k_{v3})\rho_{1s}Z_{CO_2s} + \mu_C/\mu_{O_2}k_3a_{v3}\rho_{1s}Z_{O_2s}.$$

Суммарная скорость образования угарного газа в реакциях (I) и (III):

$$W_{CO} = (W_{CO})_{II} + (W_{CO})_{III} = 2\mu_{CO}/\mu_{O_2}k_2[1 + k_v/(k_1 + k_2)]\rho_{1s}Z_{O_2s} + 2\mu_{CO}/\mu_{CO_2}(k_3 + k_{v3})\rho_{1s}Z_{CO_2s} + 2\mu_{CO}/\mu_{O_2}k_3a_{v3}\rho_{1s}Z_{O_2s}.$$

Суммарная скорость образования углекислого газа в реакции (I) и его поглощения в реакции (III):

$$W_{CO_2} = (W_{CO_2})_I - (W_{CO_2})_{III} = \mu_{CO_2}/\mu_{O_2}k_1[1 + k_v/(k_1 + k_2)]\rho_{1s}Z_{O_2s} - (k_3 + k_{v3})\rho_{1s}Z_{CO_2s} - \mu_{CO_2}/\mu_{O_2}k_3a_{v3}\rho_{1s}Z_{O_2s}.$$

Для реакций при различных температурах и диаметрах нужно рассмотреть два предельных случая [10, 11].

*Кинетическая область.* При невысоких температурах и диаметрах частицы, для которых числа Семенова малы ( $Se_v < 1$ ;  $Se < 1$ ;  $Se_3 = (k_3/\beta) \ll 1$ ), реализуется кинетическая область протекания химических реакций. Для  $Se_v < 0,55$  константу внутреннего реагирования приближенно можно описать в виде

$$k_v = D_v/r_s (Se_v \text{cth} Se_v - 1) \approx D_v/r_s \left( 1 + \frac{Se_v^2/2}{1 + Se_v^2/6} - 1 \right) \approx D_v/r_s Se_v^2/3 = (k_1 + k_2)F_v\delta/6.$$

То есть, константа внутреннего реагирования линейно возрастает при увеличении диаметра.

Малость числа Семенова  $Se$  означает, что концентрация кислорода практически не зависит от координаты частицы  $\langle Z_{O_2} \rangle_v \approx Z_{O_2s} \approx Z_{O_2}$  и, следовательно, тогда

$$W_{Ck} = \mu_C/\mu_{O_2}(k_1 + 2k_2)(1 + F_v\delta/6)\rho_{1s}Z_{O_2} + \mu_C/\mu_{CO_2}k_3(1 + F_v\delta/6)\rho_{1s}Z_{CO_2},$$

$$Z_{O_2s} = Z_{O_2}; Z_{CO_2s} = Z_{CO_2}; Z_{COs} = Z_{CO}; Z_{N_2s} = 1 - Z_{O_2} - Z_{CO_2} - Z_{CO}.$$

При протекании реакций в кинетической области суммарная скорость  $W_{Ck}$  не зависит от относительной скорости движения частицы, она определяется внутренними реакциями и с ростом температуры увеличивается по аррениусовской зависимости, а с ростом диаметра частицы – по линейному закону.

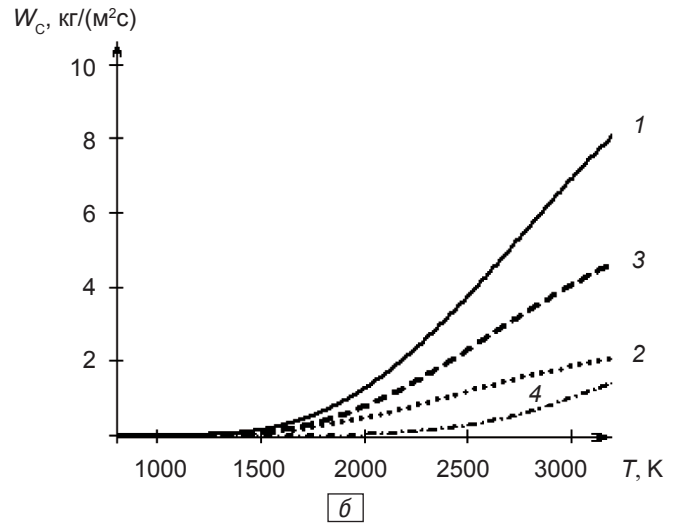
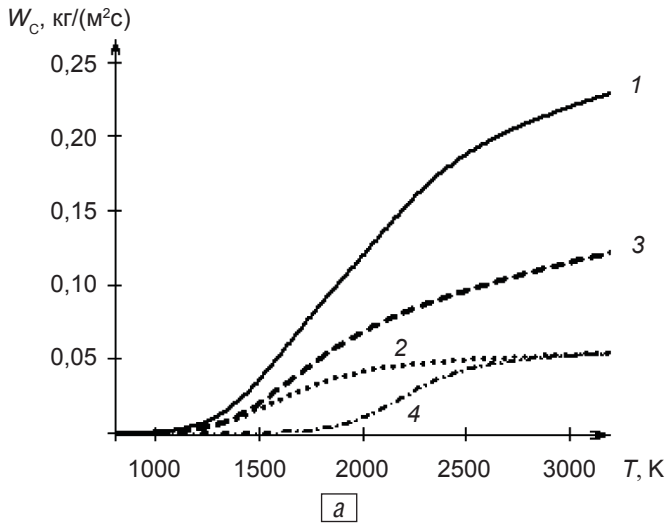
*Диффузионная область.* При высоких температурах и диаметрах частицы числа Семенова имеют значительную величину ( $Se_v \gg 1$ ;  $Se \gg 1$ ;  $Se_3 \gg 1$ ), а для  $Se_v > 5 - \text{cth} Se_v \approx 1$ . Итак, константа внутреннего реагирования в этом случае не зависит от диаметра частицы:

$$k_v = 2D_v/\delta Se_v = 2D_v/\delta \sqrt{(k_1 + k_2)F_v\delta^2/4D_v} = \sqrt{(k_1 + k_2)D_vF_v}.$$

Большое значение числа Семенова  $Se$  приводит к резкому понижению концентрации кислорода

$$Z_{O_2s} = \beta/(k_1 + k_2 + k_v + U_{sk})Z_{O_2}$$





**Рис. 2.** Температурные зависимости скоростей химических реакций (1 –  $W_c$ ; 2 –  $(W_{c,i})$ ; 3 –  $(W_{c,ii})$ ; 4 –  $(W_{c,iii})$ ) пористой углеродной частицы кокса антрацита АШ  $\delta = 100$  мкм в воздухе – движение частицы: в ламинарном потоке ( $w_2 = 0,6$  м/с) (а); в турбулентном потоке ( $w_2 = 200$  м/с) (б)

и углекислого газа

$$Z_{CO_2 s} = \mu_{CO_2} / \mu_{O_2} (k_1 / k_3 (1 + k_v / k_1 + k_2) - a_{v3}) \times (\beta / (k_1 + k_2 + k_v + U_{sk}) Z_{O_2} + \beta / k_3 Z_{CO_2})$$

В результате суммарную скорость преобразования углерода в диффузионной области можно описать следующим выражением:

$$W_{cd} = 2\mu_c / \mu_{O_2} \beta \rho_1 Z_{O_2} + \mu_c / \mu_{CO_2} \beta \rho_1 Z_{CO_2}$$

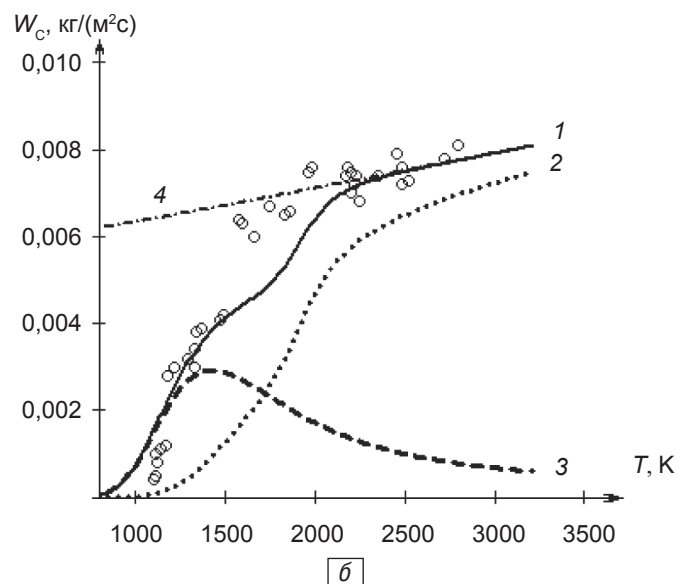
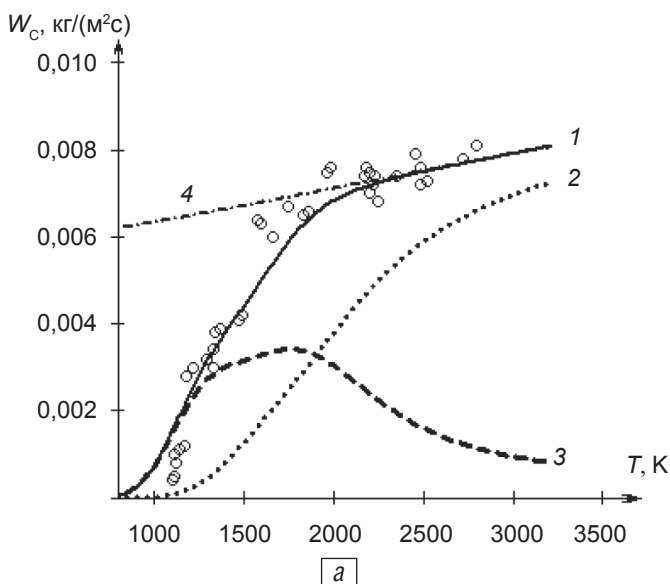
Таким образом, в диффузионной области скорость  $W_{cd}$  не зависит от внутреннего реагирования. Это объясняется тем, что молекулы кислорода, которые диффундируют к внешней поверхности частицы, практически сразу реагируют там с углеродом. Вглубь частицы кислород фактически не проникает. С ростом диаметра скорость убывания углерода уменьшается по обратно пропорциональному закону.

На рис. 2 представлены температурные зависимости скорости преобразования углерода. Сравнение с экспериментальными данными окисления круп-

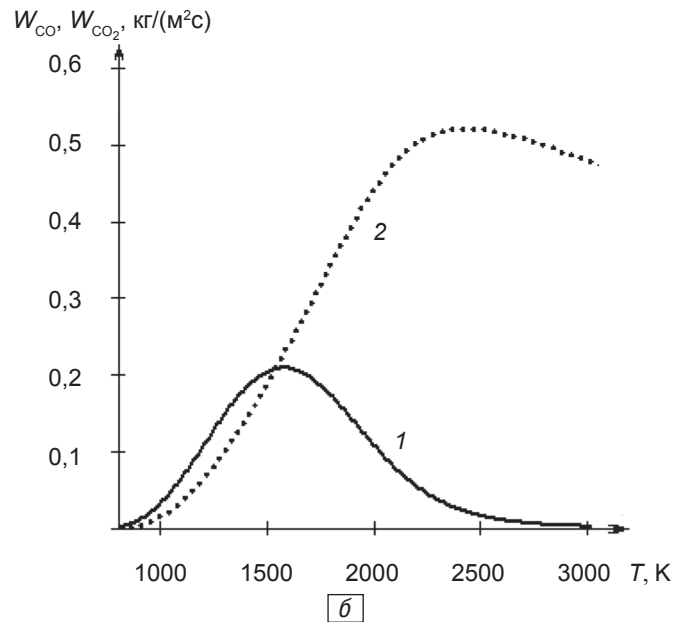
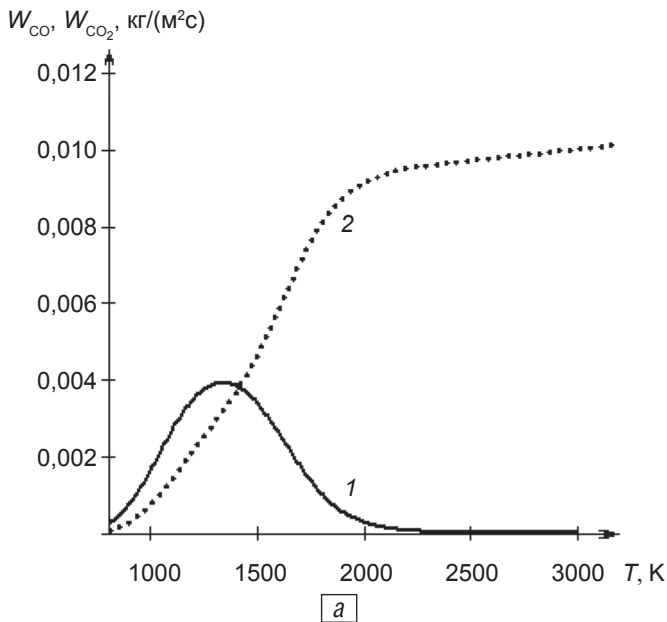
ных сферических ( $\delta = 15$  мм) частиц графита ЭГ-14 в воздухе при скорости потока 0,6 м/с (рис. 3), при которой наблюдалось равномерное их обтекание, позволяет судить об адекватности данной модели [12]. Качественное поведение слабо зависит от концентраций газообразных компонентов при условии наличия кислорода в газе.

Для реакции углерода с кислородом в диапазоне температур 1500-1900 К наблюдается небольшое уменьшение скорости взаимодействия  $O_2$  с углеродом (рис. 2). Далее скорость снова растет с увеличением температуры, а при  $T > 1900$  К она слабо зависит от температуры, следовательно, существует четко выраженная диффузионная область в широком температурном интервале.

В кинетической области (рис. 2, а) преобразование углерода происходит практически с одинаковыми скоростями в основных гетерогенных реакциях (I) и (II). Причем основная доля углерода преобразуется в порах. В переходной области скорость реакции (I) замедляется (переход в диффузионную область



**Рис. 3.** Температурные зависимости скоростей химических реакций (1 –  $W_c$ ; 2 –  $W_{c,s}$ ; 3 –  $W_{c,v}$ ; 4 –  $W_{c,d}$ ) пористой частицы графита ЭГ-14  $\delta = 15$  мм в ламинарном воздушном потоке ( $w_2 = 0,6$  м/с): учет (а); не учет (б) эндотермической реакции внутри пор; о – эксперимент Головиной [12]



**Рис. 4.** Температурные зависимости удельных массовых скоростей образования углекислого и угарного газов (1 –  $W_{CO_2}$ ; 2 –  $W_{CO}$ ) у поверхности пористой углеродной частицы кокса антрацита АШ в воздухе – движение частицы  $\delta = 100$  мкм: в ламинарном потоке ( $w_2 = 0,6$  м/с) (а); в турбулентном потоке ( $w_2 = 200$  м/с) (б)

отдельно для данной реакции) и начинает довольно медленно уменьшаться с ростом температуры. При этом возрастает роль эндотермической реакции в газификации углерода. Основным газообразным продуктом реакций становится угарный газ.

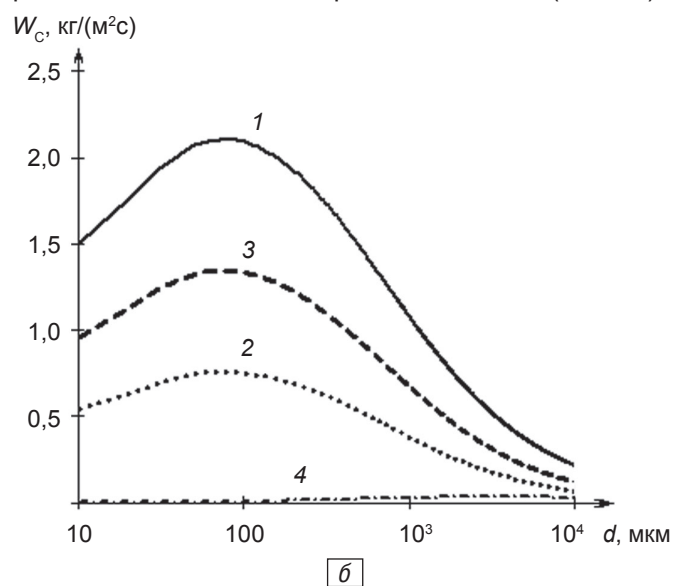
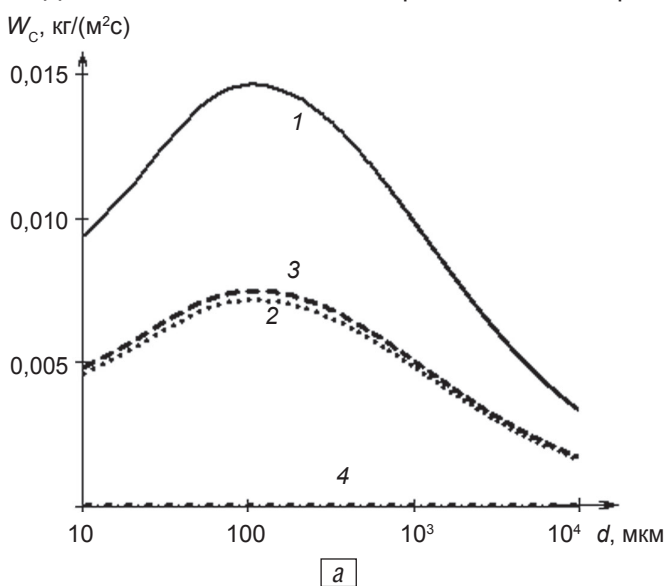
За счет повышения роли эндотермической реакции скорость реагирования углерода внутри пор слабо возрастает при повышении температуры, что дает возможность более точно объяснить экспериментальные данные (рис. 3).

Уменьшение размера частицы, как и возрастание интенсивности массообмена за счет увеличения скорости движения газа (рис. 2, б), приводит к протеканию химических реакций в кинетической области в большом диапазоне температур (до 2500 К). Но и в этом случае реакция окисления углерода до угарного газа является преобладающей (рис. 4).

Дополнительный анализ скоростей по газообраз-

ным компонентам показал, что при подключении третьей реакции (при высоких температурах) скорости исчезновения кислорода в каждой из реакций (I) и (II) становятся соизмеримыми. Аналогично скорости появления угарного газа в реакциях (II) и (III) также становятся соизмеримыми.

Ранее было отмечено, что в кинетической области (при низких температурах) скорость преобразования углерода  $W_C$  возрастает с ростом диаметра за счет реагирования в порах. В диффузионной области протекания химических реакций (при высоких температурах) скорость  $W_C$  убывает с ростом диаметра. В промежуточной области для определенного диапазона размеров частиц возможно наблюдение максимума на зависимости  $W_C(\delta)$  (рис. 5, а) [13]. Увеличение температуры приводит к сдвигу максимума в область малых диаметров и к повышению роли химических реакций на внешней поверхности частицы (табл. 2).



**Рис. 5.** Изменение скоростей химических реакций (1 –  $W_C$ ; 2 –  $(W_C)_I$ ; 3 –  $(W_C)_{II}$ ; 4 –  $(W_C)_{III}$ ) пористой углеродной частицы кокса антрацита АШ от ее диаметра в воздухе – движение частицы: в ламинарном потоке ( $w_2 = 0,6$  м/с),  $T = 1300$  К (а); в турбулентном потоке ( $w_2 = 200$  м/с),  $T = 2200$  К (б)

**Влияние температуры частицы  $T$  на ее размер  $\delta$ , соответствующий максимальной удельной скорости выгорания частицы  $W_c$  в воздухе**

Ламинарный поток ( $w_2 = 0,6$ м/с)			Турбулентный поток ( $w_2 = 200$ м/с)		
$T, K$	$\delta, \text{мкм}$	$W_c \cdot 10^2, \text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$	$T, K$	$\delta, \text{мкм}$	$W_c, \text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$
1000	1560	0,16	1600	520	0,39
1100	600	0,37	1800	260	0,75
1200	270	0,79	2000	145	1,32
1300	130	1,58	2200	85	2,17
1400	65	3,02	2400	55	3,36

Увеличение интенсивности внешнего массопереноса (турбулентное обтекание частицы газом) приводит к повышению температуры, при которой наблюдается вышеуказанный максимум для данного диапазона размеров частиц (табл. 2; рис. 5, б).

Адекватность построенной физико-математической модели, включающей совместную кинетику химических реакций углеродных частиц и массообмена с окружающим газом, основана на согласовании с экспериментальными данными зависимостей удельной скорости выгорания углеродных частиц от температуры и диаметра частицы [12, 13].

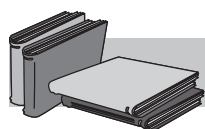
### Выводы

В данной работе показано, что с уменьшением размера частицы и увеличением интенсивности массообмена повышается уровень температур, выше которых происходит эндотермическая реакция восстановления углерода в кислородной зоне фурменного очага, которую необходимо учитывать.

Определяющую роль при характерных температурах высокотемпературного окисления частиц пылеугольного топлива играет именно реакция окисления углерода до угарного газа. В результате, бла-

годаря эндотермической реакции восстановления углерода, основным газообразным компонентом у поверхности частицы становится угарный газ.

Максимум в зависимости удельной скорости выгорания углеродной частицы от диаметра можно объяснить переходом протекания реакций из кинетической во внешнюю диффузионную область. С повышением интенсивности массообмена с газом максимум смещается в область более высоких температур.



## 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 Украины*. – 2012. – № 2-3. – С. 7-11.
2. Совершенствование и повышение эффективности доменной технологии на основе применения пылеугольного топлива (ПУТ) / Ю. В. Филатов, А. В. Емченко, В. Е. Попов др. // Там же. – 2011. – № 9-10. – С. 11-15.
3. Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи № 1 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод / В. В. Кочура, С. П. Ярошевский, В. Е. Попов и др. // Там же. – 2011. – № 9-10. – С. 16-20.
4. *Калинчук В. В.* Влияние стефановского течения и конвекции на кинетику химических реакций и тепломассообмен углеродных частиц с газами // *Инженерно-физический журнал*. – 2001. – Т. 74, № 2. – С. 51-55.
5. *Плискановский С. Т., Полтавец В. В.* Оборудование и эксплуатация доменных печей: учеб. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 495 с.
6. *Металлургия чугуна: учеб. для вузов. 3-е изд. / Под ред. Ю. С. Юсфин.* – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
7. *Чайка А. Л.* Аналитическое исследование и совершенствование процессов в фурменной зоне доменной печи: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2003. – 162 с.
8. *Основы практической теории горения / Под ред. В. В. Померанцева.* – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 312 с.
9. *Щетинков Е. С.* Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.
10. *Калинчук В. В., Зуй О. Н., Орловская С. Г.* Влияние температуры и диаметра пористых углеродных частиц на кинетику химических реакций и тепломассообмен с воздухом // *Теплофизика высоких температур*. – 2005. – Т. 43, № 5. – С. 780-788.
11. *Калинчук В. В., Зинченко Ю. А.* Анализ поверхностных концентраций газовых компонент при различных температурах и диаметрах углеродной частицы // *Междун. науч.-техн. конф. «Университетская наука 2013»: Тез. докл. Т. 1.* – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – С. 26-30.
12. *Высокотемпературное горение и газификация углерода / Под ред. Е. С. Головиной.* – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
13. *Канторович Б. В.* Введение в теорию горения и газификации твердого тела. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 355 с.

## Анотація

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

### Високотемпературний масообмін і кінетика хімічних реакцій вуглецевих частинок з газами

Проведено аналіз швидкостей паралельних хімічних реакцій вуглецю з киснем  $C + O_2 = CO_2$ ,  $2C + O_2 = 2CO$  і послідовної реакції вуглецю з діоксидом вуглецю  $C + CO_2 = 2CO$  при різних температурах і діаметрах вуглецевих частинок з урахуванням стефанівської течії, інтенсивності масообміну та внутрішнього реагування. Показано роль кожної з реакцій та склад газоподібних продуктів. В залежності від діаметру вуглецевої частинки спостерігається максимум питомої швидкості її вигорання, який зміщується в область високих температур при підвищенні інтенсивності турбулентного масообміну.

## Ключові слова

вуглець, частинка, питома швидкість вигорання, стефанівська течія, масообмін, турбулентність

## Summary

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

### High-temperature mass exchange and kinetics of chemical reactions of carbon particles with gases

Analysis of the rate of chemical conversion of carbon particles in the air depending on its diameter and temperature and intensity of mass exchange at the parallel chemical reactions of an oxygen with carbon  $C + O_2 = CO_2$ ,  $2C + O_2 = 2CO$  and the sequential reaction of carbon dioxide with carbon  $C + CO_2 = 2CO$  on the surface and in the pores of the particle was conducted with consideration of the Stefan's flow. The role of each of these reactions and of the composition of gaseous products at different temperatures and carbon particle diameters were shown. The shift of the maximum of specific rate of burnup of the particle to the higher temperatures at increase of intensity of turbulent mass transfer and its dependence on the diameter of the carbon particle has been studied.

## Keywords

carbon, particle, speed of burning, Stefan's flow, mass-exchange, turbulence

**Редакция журнала «Металл и литье Украины»  
может подготовить заказной номер издания**

Ориентировочная стоимость заказного номера – 6750 грн.  
(объем до 5 уч.-изд. л.)

Ориентировочная стоимость заказного спаренного номера – 13000 грн.  
(объем до 10 уч.-изд. л.)