

УДК. 662.6, 667

**Черненко А. С.<sup>1</sup>, Калинин В. В.<sup>1</sup>, Корчагина М. Н.<sup>1</sup>, Куземко Р. Д.<sup>2</sup>,  
Шевчук В.Г.<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Приазовский государственный технический университет

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

### **Закономерности горения зольных угольных частиц при самовоспламенении в нагретом воздухе**

*При диаметрах частиц, больше критического диаметра воспламенения в воздухе, с учетом зольности исследовано влияние начального диаметра и плотности пористых углеродных частиц на закономерности стадий временных зависимостей температуры, диаметра и плотности частиц: стадии самоускорения, квазистационарного горения и самопроизвольного погасания. Показано, что на стадии горения, которая начинается после стадии самоускорения и заканчивается при достижении диаметра и плотности погасания, скорость уменьшения произведения плотности на квадрат диаметра зольной частицы определяется реакционной способностью частиц угольной пыли и не зависит от начальных условий. Получено выражение для времени горения пористой коксовой частицы и введена новая константа горения, которая определяется свойствами и структурой угля (энергия активации, пористость).*

**Введение.** Поскольку разные марки угля отличаются по свойствам [1, 2], то для определения времени полного его сгорания необходимо учитывать его особенности структуры и свойств. В результате горения угольных частиц и уменьшения их диаметра и плотности до критических значений происходит их самопроизвольное погасание. При расчете времени сгорания угольных частиц необходимо знать: температуру горения и критические диаметры воспламенения; критические диаметры и плотности, при которых происходит самопроизвольное погасание; области горения частиц.

Известна экспериментальная формула [2] для расчета времени выгорания коксовых частиц угольной пыли, полученная при обработке экспериментальных данных в интервале относительных массовых концентраций от 23 до 98% и размеров частиц от 100 мкм до 10 мм:

$$t_{\text{bur},0} = 2.31 \cdot 10^6 k_{\text{bk}} (1 - X_A) \frac{\rho_{\text{c,b}} d_b^2}{f(T_g) Y_{\text{O}_2,\infty}}, \quad (1)$$

где функция  $f(T_g) = T_g^{0.9}$  учитывает влияние температуры газового потока на время горения. Численный коэффициент в формуле (1) был получен с определенной ошибкой в пределах  $(1.4 \div 3.1) \cdot 10^6$ . Экспериментальный коэффициент  $k_{\text{bk}}$  для различных углей определялся относительно условно выбранного эталонного угля (для антрацита  $k_{\text{bk}} = 1$ ). Поэтому экспериментальное определение  $k_{\text{bk}}$  для конкретно используемых углей продолжается и в настоящее время, на-

пример в [5], где реакционную способность угля определили как величину обратную коэффициенту  $k_{\text{вк}}$ . Естественно, что величина реакционной способности угля должна определяться кинетическими свойствами угля, а также учитывать параллельное образование оксидов углерода, пористость угля, наличие стефановского потока.

**Целью данной работы** был анализ временных зависимостей температуры, диаметра и плотности пористой углеродной частицы для определения закономерностей ее горения в диффузионном режиме, определение константы горения угольной частицы, определение времени горения от параметров газовой среды и частицы, анализ коэффициента реакционной способности.

**Постановка задачи.** Экспериментально доказано и теоретически обосновано [4] неизотермическое и необратимое протекание параллельных экзотермических реакций первого порядка по кислороду реакций углеродной частицы с газами, содержащими кислород:  $C + O_2 \xrightarrow{k_1} CO_2$  (I),  $\Delta H_1 = -395$  кДж/моль и  $2C + O_2 \xrightarrow{k_2} 2CO$  (II),  $\Delta H_2 = -209$  кДж/моль. В работе [5] установлено, что скорости появления продуктов реакций  $CO_2$  и  $CO$  в процессе горения коксовых частиц соизмеримы.

Суммарная скорость химических реакций по углероду:

$$\frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial(m_c)}{\partial t} = -\frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{\text{г,с}} Y_{O_2,\text{с}},$$

где  $m_c$  – масса углерода в частице, кг.

Скорости химических реакций и суммарная скорость химического тепловыделения увеличиваются с ростом температуры по закону Аррениуса и определяются первым порядком по концентрации кислорода. Исследования [1] показывают на связь энергий активации  $E$  и передэкспоненциальных множителей  $k_0$  реакций ( $k_* = 100$  м/с,  $T_* = 2600$  К):

$$k_i = k_{0i} \exp\left[-\frac{E_i}{RT}\right], \quad k_{0i} = k_* \exp\left[\frac{E_i}{RT_*}\right], \quad E_2/E_1 = 1.1,$$

где  $T$  – температура частицы, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Скорость химического тепловыделения:

$$q_{\text{chl},2} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) (1 - X_A) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{\text{г,с}} Y_{O_2,\text{с}},$$

$$Y_{O_2,\text{с}} = Y_{O_2,\infty} \frac{1}{1 + \text{Se}}, \quad \text{Se} = \frac{d}{D\text{Nu}} (k_1 + k_2 + k_v + U_{s0}),$$

где  $Q_1, Q_2$  – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II), рассчитанные на единицу массы кислорода, Дж/кг $O_2$ ;  $k_1, k_2$  – константы скоростей химических реакций (I) – (II);  $Y_{O_2,\text{с}}$  – относительная массовая доля кислорода в газе у поверхности частицы;  $\rho_{\text{г,с}}$  – плотность окружающего газа у поверхности частицы,

кг/м<sup>3</sup>; Se – общий критерий Семенова, который показывает роль кинетики реакций на поверхности и внутри углеродной частицы, стефановского течения относительно массопереноса окислителя в газе.

Наличие золы в угле уменьшает массовую долю углерода, вступающего в реакцию. Уменьшение массы углерода  $m_c$  связано через скорость изменения массы всей частицы (предполагая, что по мере выгорания частицы зола отслаивается от ее поверхности [1]), которая определяется скоростями уменьшения диаметра и плотности частицы:

$$\frac{\partial(m_c)}{\partial t} = (1 - X_A) \frac{\partial(m_p)}{\partial t} = (1 - X_A) d^3 \frac{\pi}{6} \frac{\partial(\rho_c)}{\partial t} + (1 - X_A) \frac{\pi}{2} \rho_c d^2 \frac{\partial(d)}{\partial t},$$

где  $\rho_c$  – плотность угольной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр частицы, м;  $X_A$  – массовая доля золы.

Уменьшение диаметра и плотности частицы со временем обусловлено химическими реакциями (I) и (II) на ее внешней поверхности и в объеме[5]:

$$-\frac{\partial d}{\partial t} = 2(1 - X_A)^{-1} \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{\rho_{gs}}{\rho_c} Y_{O_2,s}, \quad d(t=0) = d_b, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = \frac{6}{d} (1 - X_A)^{-1} \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{gs} Y_{O_2,s}, \quad \rho_c(t=0) = \rho_{c,b}, \quad (3)$$

где  $M_C$ ,  $M_{O_2}$  – молярные массы углерода и кислорода, кг/моль.

Реагирование внутри пор частицы определяется эффективной константой внутреннего реагирования  $k_v$ , которая определяется порозностью частицы  $\chi$  и удельной поверхностью пор  $F_v$  [1, 5].

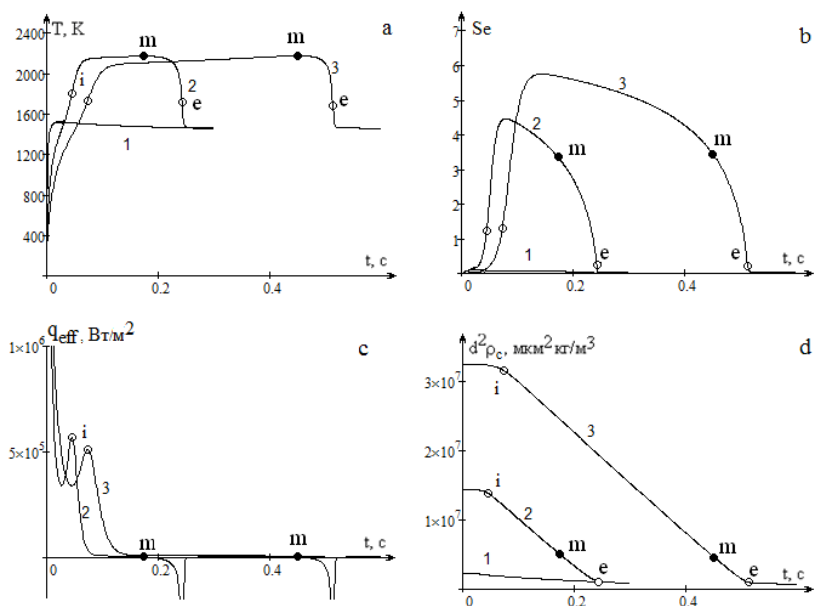
Кинетика тепломассообмена и химических реакций углеродной частицы с газами рассматривается с учетом стефановского течения, массопереноса и реагирования внутри частицы на поверхности пор. В работе [5] показано, что зависимость от времени средней по всему объему температуры пористой углеродной частицы находится из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{6}{c_p \rho_c d} \cdot q_{eff}, \quad q_{eff} = q_{ch12} - q_{h\Sigma}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (4)$$

$$q_{h\Sigma} = \frac{\lambda_g Nu}{d} (T - T_g) + U_{s0} \rho_{gs} c_g T_g \frac{1}{1 + Se} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4),$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость частицы, Дж/(кг·К);  $T$ ,  $T_g$ ,  $T_w$  – температуры поверхности частицы, окружающего газа и окружающих тел, К;  $\varepsilon$  – коэффициент черноты частицы;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);  $U_{s0}$  – массовая скорость стефановского течения, м/с [5].

**Анализ результатов.** Рассмотрим динамику изменения температуры, диаметра, плотности пористой углеродной частицы и диффузионно-кинетического отношения (рис. 1) для двух начальных диаметров частиц, превышающих диаметр воспламенения  $d_i$  при заданных значениях температуры воздуха и температуре стенок реакционной установки ( $d_2, d_3 > d_i, d_1 < d_i$ ). Уменьшение диаметра и плотности частицы в процессе горения приводит к медленному росту ква-



**Рис. 1.** Временные зависимости температуры частицы, числа Семенова, эффективной скорости тепловыделения и произведения плотности на квадрат диаметра пористой углеродной частицы (кривая 1 – начальный диаметр 40 мкм (меньше диаметра самовоспламенения  $d_i = 45$  мкм); 2 – 100 мкм, 3 – 150 мкм. Расчет по (1) – (3). Параметры:  $E_1 = 140$  кДж/моль;  $T_g = 1400\text{К}$ ,  $T_w = 1400$  К,  $F_{v0} = 2 \cdot 10^4$  м<sup>-1</sup>;  $\chi = 0.1$ ;  $Y_{O_2\infty} = 0.23$ ,  $T_b = 300\text{К}$ ,  $X_A = 4.6\%$ .

зистационарной температуры горения. За счет теплотерь излучением с уменьшением диаметра частицы общие теплотери увеличиваются не так быстро, как тепловыделение за счет увеличения массопереноса кислорода к единице поверхности частицы. При определенном размере частицы и достижении максимальной температуры горения ( $t_m$ ) эти скорости сравниваются. Дальнейшее понижение температуры горения связано с относительным ростом теплотерь над тепловыделением по мере уменьшения диаметра частицы.

При достижении критических значений  $d_e$  уменьшается температура частицы, что приводит к резкому снижению скорости реагирования пористой углеродной частицы. При самопроизвольном погасании плотность частицы уменьшается с ростом ее начального диаметра, а ее диаметр практически не изменяется (табл.1).

Из рис. 1 видно, что для пористых частиц, когда плотность в процессе горения существенно снижается, линейно изменяется со временем не квадрат диаметра, как обычно имеет место при диффузионном режиме горения, а произведение квадрата диаметра частицы на ее плотность. В этом случае наклон кривых (рис. 1d) не зависит от начальных значений диаметра и плотности. Поэтому имеет смысл ввести новую константу горения частицы.

**Таблица 1.** Влияние начального размера частицы ( $\rho_{c,b} = 1440 \text{ кг/м}^3$ ,  $F_{v0} = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ ,  $\chi = 0.1$ ,  $X_A = 4.6\%$ .) на параметры погасания в нагретом воздухе ( $T_g = 1400\text{K}$ ,  $T_w = 1400 \text{ K}$ ;  $Y_{O_2,\infty} = 0.23$ ).

$d_b$ , МКМ	50	100	150	200
$\rho_{c,e}$ , $\text{кг/м}^3$	1280	1140	1040	960
$d_e$ , МКМ	21.6	21.6	21.7	21.8
$\rho_{c,e} d_e^2$ , $\text{МКМ}^2 \cdot \text{кг/м}^3$	$6.00 \cdot 10^5$	$5.32 \cdot 10^5$	$4.91 \cdot 10^5$	$4.55 \cdot 10^5$
$T_e$ , К	1807	1812	1844	1846

Подобие горения частиц различных размеров видно при использовании безразмерных величин (рис. 2). Так в качестве реперной температуры для углерода выбрана температура полюса  $T_* = 2600 \text{ K}$ . Характерным масштабом времени выбрана величина

$$t_a = \frac{M_{O_2}}{M_c} \frac{\rho_0 d_0^2}{8D_{g0}\rho_{g0}Y_{O_2}}$$

целесообразность которой будет видна после получения выражения для модифицированной константы горения пористой угольной частицы.

В качестве масштаба для оси ординат на рис. 2с взята величина «максимальной» скорости эффективного тепловыделения в диффузионной области, рассчитанной для начального диаметра и температуры  $T_* = 2600 \text{ K}$  при протекании только реакции (II):

$$q_{\text{dif,max}} = Q_{a2} Y_{O_2} \frac{D_g \rho_g Sh}{d_b}$$

Как видно из рис.2, чем ближе начальный диаметр частицы к критическому диаметру самовоспламенения, тем больше отклонения от характерного хода кривых. В выбранных координатах период индукции является функцией диаметра частицы в отличие от времени горения, которое определяется лишь углом наклона кривых или модифицированной константой горения.

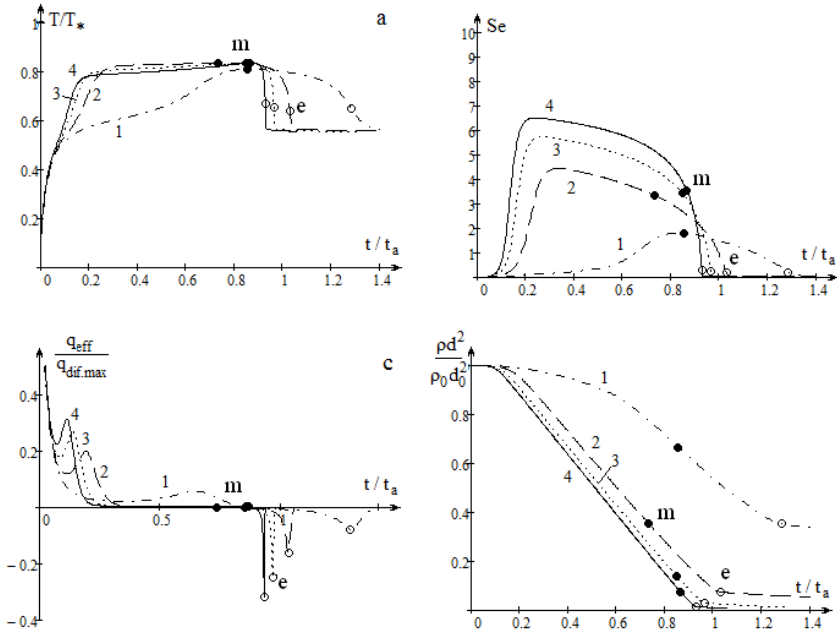
Для выбранных размеров частиц можно считать, что реакции горения частицы протекают в диффузионной области (рис. 1b), т.е.  $Se \gg 1$ . В этом случае суммируя оба уравнения (2) и (3), и умножив, соответственно, их на  $2d\rho_c$  и  $d^2$ , получим в результате общий закон изменения величины  $\rho_c d^2$  со временем

$$\frac{\partial(\rho_c d^2)}{\partial t} = -(1 - X_A)^{-1} 4Sh \frac{M_c}{M_{O_2}} D_g \rho_g Y_{O_2,\infty} \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right). \quad (5)$$

В предположении независимости от времени правой части, интегрирование (5) в пределах времени горения приводит к временному закону изменения комплекса  $\rho d^2$  при горении частицы кокса угля:

$$\rho_c d^2 = \rho_{c,b} d_b^2 - K_{bur} (t - t_{ind}), \quad \rho d^2 \Big|_{t=t_{ind}} = \rho_{c,b} d_b^2, \quad (6)$$

где  $t_{ind}$  – период индукции и время начала горения частицы.



**Рис. 2.** Безразмерные временные зависимости температуры частицы, числа Семенова, эффективной скорости тепловыделения и произведения плотности на квадрат диаметра пористой углеродной частицы (кривая 1 – начальный диаметр 200 мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 50 мкм. Расчет по (2) – (4).

В начале процесса горения размер и плотность частицы близки к начальным значениям, а в конце горения – к диаметру и плотности погасания, для которых, как видно из рис. 1d, справедливо  $\rho_{c,b}d_b^2 \gg \rho_{c,e}d_e^2$ . Поэтому теоретическая формула для времени горения при использовании модифицированной константы горения  $K_{bur}$  имеет следующий вид:

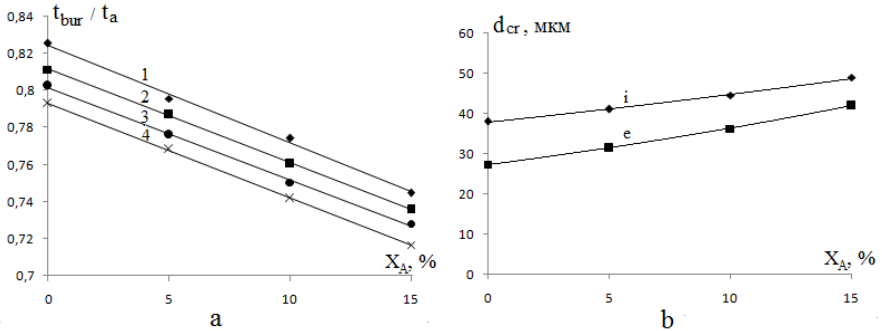
$$t_{bur} = \frac{\rho_{c,b}d_b^2}{K_{bur}}, \quad K_{bur} = (1 - X_A)^{-1} 4Sh \frac{M_C}{M_{O_2}} D_g \rho_g Y_{O_2,\infty} \cdot K_r, \quad (7)$$

$$K_r = \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right).$$

В безразмерных переменных формула (7) выглядит следующим образом:

$$\frac{t_{bur}}{t_a} = \frac{\rho_{c,b}d_b^2}{\rho_0 d_0^2} \frac{2}{Sh} \frac{D_{g0} \rho_{g0}}{D_g \rho_g} \left( \frac{1 - X_A}{K_r} \right).$$

Константа  $K_{bur}$  достаточно слабо зависит от температуры газа согласно степенной зависимости произведения коэффициента диффузии кислорода в га-



**Рис.3.** а) Зависимость относительного времени горения коксовой частицы  $t_{bur} / t_a$  в нагретом воздухе (1400 К) от содержания золы  $X_A$ . Начальный диаметр частицы  $d_b$ : 1) 100, 2) 150, 3) 200, 4) 250 мкм.  
 б) Зависимость критического диаметра погасания (e) и самовоспламенения (i) от содержания золы  $X_A$ .

зе и плотности газа от температуры в виде  $D_g \rho_g = D_{g0} \rho_{g0} \left( \frac{T_g + T_*}{2T_0} \right)^{n-1}$ . Константа горения определяется теплофизическими свойствами газа (воздуха) и кинетическими свойствами угля и не зависит от давления газовой смеси.

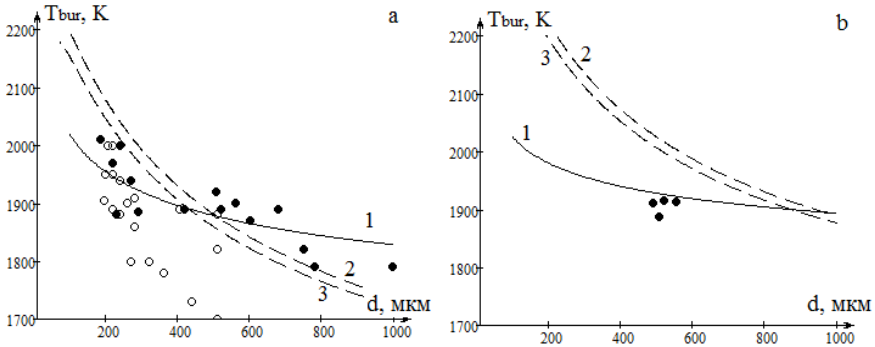
Расчеты по формулам (1) и (7) дают согласующиеся значения. Например, времена горения частицы антрацита 200 мкм при температуре поверхности 2200 К в нагретом воздухе 1400 К равны  $t_{bur} = 584$  мс и  $t_{bur0} = 813$  мс. Время горения по нестационарной модели составляет 733 мс.

Формула (1) выполняется при высоких температурах газовой смеси, когда происходит самовоспламенение частицы. Однако, при более низких температурах, когда еще возможно зажигание частиц [5] и температуры газа и горячей частицы значительно отличаются, необходимо использовать выражение (7).

**Влияние зольности угля.** Критический диаметр самовоспламенения углеродной частицы  $d_i$ , который согласно классическим представлениям [6] обратно пропорционален плотности химического тепловыделения при температуре окружающей среды, а также величине  $(1-X_A)$ , т.е. возрастает с ростом содержания золы в угле.

При начальных размерах коксовой частицы, превышающих диаметр самовоспламенения согласно (7), аналитически удастся установить связь времени горения коксовой частицы от содержания в ней золы, начальных размеров частицы и свойств угля.

В целом наблюдается линейная убывающая зависимость времени горения от массовой доли золы в угле (рис. 3а). Диаметр частицы при самопроизвольном погасании практически не зависит от начального размера частицы, его зависимость от зольности частицы (рис. 3б) качества сходна с зависимостью  $d_i$  ( $X_A$ ).



**Рис. 4.** Зависимость температуры горения углеродной частицы от ее начального диаметра для а)  $T_g = 1400 \text{ K}$ ,  $Y_{O_2} = 0.23$ , б)  $T_g = 1600 \text{ K}$ ,  $Y_{O_2} = 0.23$ .

1) формула (8); 2) зависимость (9),  $X_p = 0\%$ ; 3) зависимость (9),  $X_p = 4.6\%$ .  
Точки  $\circ$  – данные Ивановой, Бабия [1],  $\bullet$  – данные Бабия [2].

Температура горения коксовой частицы практически линейно уменьшается с ростом зольности частицы. Так при горении в нагретом воздухе (1400 К) при увеличении массовой доли золы на 5% понижение составляет около 60 К.

**Температура горения.** В работе [2] проведены экспериментальные исследования температуры горящих частиц антрацита размером от 150 мкм до 800 мкм. Массовая доля кислорода в составе газа варьировался в пределах 5-23%, температура газа изменялась от 1200 до 1600 К, причем температура стенок реакционной камеры отличалась от температуры газа не более чем на 10-30 К. В результате экспериментальные данные были описаны единым уравнением, отражающим зависимость перепада температуры между горящей угольной частицей и газом от размера частицы  $d$  (в м), температуры газа  $T_g$  (в К) и относительной массовой концентрации кислорода  $Y_{O_2}$  в нем:

$$T_{bur} - T_g = 6.21 \cdot (1900 - T_g)^{0.74} d^{-0.16} Y_{O_2}. \quad (8)$$

Завершение периода индукции характеризуется достижением температуры, близкой к температуре горения. Наиболее простым способом оценки ее значения является использование условия стационарности температуры при протекании реакций в диффузионной области:

$$\left( \frac{Q_1 k_1 + Q_2 k_2}{k_1 + k_2} \right) (1 - X_A) \rho_g \beta Y_{O_2} = (\beta c_g \rho_g + 4 \epsilon \sigma T_{g,eff}^3) (T_{bur} - T_g).$$

Откуда

$$T_{bur} \approx T_g + (1 - X_A) \frac{Q_{eff} Y_a}{c_g} \frac{1}{1 + \frac{4 \epsilon \sigma T_{g,eff}^3}{D_g N u_{c,g} \rho_g} d},$$



$$Q_{eff} = \frac{Q_1 k_1 + Q_2 k_2}{k_1 + k_2}, \quad T_{g,eff} = T_g - \frac{\varepsilon \sigma (T_g^4 - T_w^4)}{\alpha + 4 \varepsilon \sigma T_g^3},$$

что объясняет уменьшение  $T_{bur}$  с ростом диаметра частицы.

В более общем случае зависимость диаметра частицы углерода от ее стационарной температуры, описывающую критические и устойчивые режимы тепломассообмена, можно представить в виде [5]:

$$d = \frac{\lambda_g Nu}{Q_1 k_{01} (1 - X_A) \left(1 + \frac{Q_2 k_2}{Q_1 k_1}\right) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \rho_{gs}} \cdot \frac{(T - T_g)}{\left(B + \sqrt{B^2 - A_g A_w}\right)} \exp\left(\frac{E_1}{RT}\right) \quad (9)$$

$$A_g = \frac{c_{pg} (T - T_g)}{1 - X_A} \frac{(k_1 + k_2) \left(1 + \frac{k_v + U_{sk}}{k_1 + k_2}\right)}{(Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right)}, \quad A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{(Q_1 k_1 + Q_2 k_2) (1 - X_A) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \rho_{gs}},$$

$$A_{sf} = \frac{M_C c_{pg} T^*}{M_{O_2} (1 - X_A) (Q_1 k_1 + Q_2 k_2)} \frac{(k_1 + 2k_2)}{1}, \quad B = \frac{1}{2} \left( (1 - A_{sf}) Y_{O_2\infty} - A_g - A_w \right).$$

На рис. 4 показано сравнение значений температур горения, полученных численным путем с использованием эмпирической формулы (8) и стационарной зависимостью (9). Результаты качественно согласуются. Согласно зависимости (9) температура горения частицы убывает с диаметром пропорционально  $T_{bur} \sim d^{-0.10+0.11}$ . Существенное превышение расчетных значений температуры горения над экспериментальными данными (рис. 4б) при высоких температурах окружающего газа обусловлено не учетом эндотермической гетерогенной реакции  $C + CO_2 = 2CO$  [6], вклад которой существенный при температурах частицы выше 2000 К.

Эмпирическая зависимость (8) не иллюстрирует влияние зольности угля, что является ее недостатком. В тоже время зависимость (9) позволяет с поправкой на эндотермическую реакцию описывать уменьшение температуры горения частицы кокса при наличии в ней золы.

**Выводы.** В результате анализа временных зависимостей температуры, диаметра и плотности частицы кокса удалось установить аналитические зависимости времени и температуры горения в зависимости от начальных размеров частицы, кинетических свойств угля и массовой доли золы. Установлено, что в процессе горения частиц для случая ее самовоспламенения в нагретом воздухе необходимо пользоваться модифицированной константой горения, которая определяет линейное уменьшение со временем произведения плотности и квадрата диаметра пористой частицы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.

2. Бабий В. И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М., 1986. – 208 с.
3. Хаджинов Е. А. Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива // Металл и литье Украины – 2013. – №11. – С. 9-13.
4. Яворский И.А. Квантово-химические представления о механизме реагирования углеродных материалов с газами//Кинетика горения ископаемых топлив. – 1978. – № 2. – С. 5-26.
5. Калинин В.В., Черненко А.С., Корчагина М.Н. Влияние параметров газовой смеси на максимальную температуру и скорость горения углеродной частицы // Физика аеродисперсных систем. – 2016. – № 53. – С.105-116.
6. Калинин В.В., Черненко А.С., Зинченко Ю.А. Зажигание, горение и погасание углеродных частиц при параллельно-последовательном образовании оксидов углерода // Металл и литье Украины. – 2013. – № 10. – С. 21-27.

**Chernenko A. S., Kalinchak V. V., Korchagina M. N., Kuzemko R. D.,  
Shevchuk V. G.**

### **Regularities in combustion of ash containing coal particles during ignition in heated air**

#### Summary

*The effect of porous carbon particles initial diameter and density on the regularities of their temperature, diameter and density histories from the self-acceleration, quasi-stationary combustion and spontaneous extinction stages is studied at particles sizes exceeding the critical value of diameter, corresponding to the particle ignition in air. It is shown that at the burning stage, which begins after the self-acceleration stage and ends, when the diameter and density of particles extinction are reached, the descent rate of the product of the particle density and the diameter squared depends on the reactivity of the coal dust particles and does not depend on the initial conditions. An expression for the burning time of a porous coke particle is obtained and a new burning constant is introduced, which is determined by the properties and structure of the coal (activation energy, porosity).*

**Черненко О. С., Калинин В. В., Корчагина М. М., Куземко Р. Д.,  
Шевчук В. Г.**

### **Закономірності горіння зольних вугільних частинок при самозайманні в нагрітому повітрі**

#### Анотація

*При діаметрах частинок, більше критичного діаметра займання в повітрі, з урахуванням зольності досліджено вплив початкового діаметра і густини поруватих вуглецевих частинок на закономірності стадій часових залежностей температури, діаметра і густини частинок: стадії самоприскорення, квазістаціонарного горіння і самовільного згасання. Показано, що на стадії горіння, яка починається після стадії самоприскорення і закінчується при досягненні діаметра і густини згасання, швидкість зменшення добутку густини на квадрат діаметра зольної частинки визначається реакційною здатністю частинок вугільного пилу і не залежить від початкових умов. Отримано вираз для часу горіння поруватої коксової частинки і введена нова константа горіння, яка визначається властивостями і структурою вугілля (енергія активації, поруватість).*