

О.С. ЧЕРНЕНКО, В.В. КАЛІНЧАК, А.П. БАТУРІНА

Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова  
(Вул. Дворянська, 2, Одеса 65082; e-mail: teplophys@onu.edu.ua)**ОЦІНКА ПОРУВАТОСТІ ЧАСТИНКИ  
КОКСУ ВУГІЛЛЯ ЗА ДАНИМИ ЇЇ ВИГОРАННЯ**

УДК 662.6, 667

*Проводиться аналіз залежності густини від діаметра поруватої частинки коксу при її горінні в зовнішньому дифузійному режимі. Показано, що при значеннях внутрішнього дифузійно-кінетичного відношення  $Se_v > 5$  можливо в аналітичному вигляді отримати потрібну залежність. Вигляд аналітичної залежності різний у припущенні об'ємної дифузії і дифузії Кнудсена всередині пор. Проводиться їх графічне порівняння з емпіричною степеневою залежністю. Отримані таким чином значення показників степеня в аналітичних залежностях дозволяють оцінити ефективну питому поверхню пор.*

*Ключові слова:* частинка, кокс, горіння, поруватість, діаметр, густина.

**1. Вступ**

При використанні вугільного пилу в ролі палива важливим питанням залишається прогноз ступеня його вигорання. Більшість робіт фокусуються на кінетиці і не визначають кількісно такі властивості, як діаметр частинок, густина, пористість, питома поверхня пор і їх зміну в процесі вигорання. Існує ряд експериментальних даних по зміні діаметра і густини частинок коксу різних марок вугілля [1–4]. Незважаючи на те, що є великий розкид і аналіз горіння кожного вугілля необхідно розглядати індивідуально, залежність зміни густини від діаметра частинки можна апроксимувати залежністю

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

У різних дослідженнях використовувалися різні підходи і методи вимірювань. В цілому вид палива, розмір, умови згорання, зокрема температура горіння, роблять сильний вплив на режим згорання. До того ж в процесі вигорання частинки змінюється і поруватість і питома поверхня пор.

Більшість даних представлені при високих температурах (1200–2200 К) і для дрібних частинок (від 10 до 100 мкм), що типово при спалюванні пилувугільного факела [5]. В основному частинки горять зі зменшенням густини і діаметра з різними показниками  $\alpha$  в залежності від зовнішніх умов.

Як параметр, що дозволяє встановити режим горіння частинки [6, 7], використовується коефіцієнт ефективності  $\eta$ . Він визначається відношенням ефективної швидкості реакції з урахуванням масопереносу окислювача до швидкості хімічної реакції. Його значення змінюється в межах  $0 < \eta < 1$  і залежить від морфології матеріалу частинки, діаметра і питомої поверхні пор. Як правило, підвищення поруватості частинки, питомої поверхні і діаметра пор приводить до збільшення швидкості її горіння.

Стадія горіння частинки коксу вважається найбільш повільною. На її тривалість впливають дифузія окислювача до зовнішньої поверхні і поверхні пор вуглецевого масиву, а також температури газової суміші і частинки. Для крупних вугільних частинок характерно те, що летючі гази покидають частинку до початку стадії горіння. Таким чином, горить лише коксовий залишок. Кокс вугілля з високим вмістом летючих достатньо поруватий. Тому зміна поруватості частинки в процесі горіння може бути істотною, незважаючи на те, що багато хто приймає слабку роль внутрішнього реагування в процесі горіння.

При низьких температурах поверхневі реакції визначають сумарну швидкість реакцій і реагування проникає у всі пори ( $\eta = 1$ ). Розмір частинки практично не змінюється, а густина поступово зменшується.

При дуже високих температурах дифузія окислювача лімітує швидкість реакцій. Реагування відбувається переважно на зовнішній поверхні ча-

© О.С. ЧЕРНЕНКО, В.В. КАЛІНЧАК,  
А.П. БАТУРІНА, 2020

стинки ( $\eta = 0$ ) і концентрація окислювача всередині частинки близька до нуля. Тому густина частинки в процесі горіння залишається незмінною, а діаметр зменшується.

Найбільш цікавим випадком, який і буде розглядатися в даній роботі, є проміжна ділянка температур горіння, де одночасно в процесі горіння зменшуються густина і діаметр частинки.

Для встановлення таких режимів окислення зазвичай знижують концентрацію кисню в суміші (наприклад, до 5–10 об.%) [8]. Тоді температури горіння частинок помітно знижуються. Аналогічного ефекту можна добитися при низьких температурах суміші (холодні суміші). В цьому випадку реалізація режиму горіння здійснюється в результаті вимушеного займання чи запалювання [9].

Метою даної роботи є аналіз залежностей густини від діаметра поруватої вуглецевої частинки для встановлення закономірностей при її горінні в зовнішньому дифузійному режимі; проаналізувати як залежить показник степеня  $\alpha$  від природи, внутрішньої структури частинок вугілля (поруватості).

## 2. Постановка задачі

В процесі горіння частинки можна прийняти, що її реагування протікає в дифузійній області і температура горіння частинки змінюється достатньо слабо. Зменшення діаметра і густини вуглецевої частинки з часом представляється у вигляді [10]:

$$\rho \frac{\partial(d^2)}{\partial t} = - \left( \frac{100 - X_A}{100} \right)^{-1} \times \frac{4M_C}{M_{O_2}} D_g Sh \rho_g Y_{O_2} \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})}, \quad (2)$$

$$d^2 \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = - \left( \frac{100 - X_A}{100} \right)^{-1} \frac{6M_C}{M_{O_2}} \times D_g Sh \rho_g Y_{O_2} \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} \frac{k_v}{(k_1 + k_2)}, \quad (3)$$

$$d(t=0) = d_0, \rho(t=0) = \rho_0.$$

Зменшення діаметра частинки зумовлене хімічними реакціями (I) і (II) на її зовнішній поверхні, а зменшення густини частинки – протіканням реакцій усередині пор.

Тут  $\rho_{gs}$  – густина навколишнього газу біля поверхні частинки,  $kg/m^3$ ;  $M_C, M_{O_2}$  – молярні маси вуглецю і кисню,  $kg/mol$ ;  $k_1, k_2$  – константи

швидкостей хімічних реакцій (I)–(II);  $k_v$  – ефективна константа внутрішнього реагування;  $Y_{O_2}$  – відносна масова частка кисню в газі,  $D_g$  – коефіцієнт дифузії кисню в газі,  $m^2/s$ ;  $\rho_0$  – початкова густина частинки,  $kg/m^3$ ,  $X_A$  – масова частка золи в вугіллі.

Експериментально [1–3] зручно визначати окремо залежності відносного діаметра і густини від масової частки частинки, що не згоріла. Ці залежності з деяким наближенням можна описати степеневою залежністю, де показники степеня пов'язані з  $\alpha$ :

$$\rho/\rho_0 = (m/m_0)^{\frac{\alpha}{3+\alpha}}, \quad d/d_0 = (m/m_0)^{\frac{1}{3+\alpha}}. \quad (4)$$

Показники степеня варіюються в залежностях (4) в межах  $0 \leq \frac{1}{3+\alpha} \leq \frac{1}{3}$  і  $0 \leq \frac{\alpha}{3+\alpha} \leq 1$ .

Для оцінки швидкості зміни густини частинки розділимо один на одне вирази (2) і (3). В результаті отримаємо

$$\frac{\partial \rho}{\partial d} = 3 \frac{\rho}{d} \frac{k_v}{k_1 + k_2}. \quad (5)$$

Константа внутрішнього реагування в загальному вигляді залежить і від діаметра, і від густини частинки. Вона в загальному випадку визначається поруватістю частинки  $\chi$  і питомою поверхнею пор  $F_v$  [11]:

$$k_v = \frac{2D_v}{d} (Se_v \coth Se_v - 1), \quad (6)$$

$$Se_v = \sqrt{\frac{F_v d^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}},$$

Використання цього виразу не дозволяє в аналітичному вигляді визначити залежність  $\rho(d)$ . При значенні критерію  $Se_v \geq 5$  для виразу константи внутрішнього реагування можливе спрощення:

$$k_v = \sqrt{D_v F_v} (k_1 + k_2), \quad (7)$$

що говорить про незалежність її від зовнішнього діаметра частинки.

Якщо припустити, що коефіцієнт внутрішньої дифузії і питома поверхня пор не залежать від густини частинки, то величина  $k_v = \text{const}$  і, після інтегрування (5), отримуємо залежність вигляду (1), де

$$\alpha = 3 \sqrt{\frac{D_v F_v}{k_1 + k_2}} = \text{const}.$$

Тут  $Se_v$  – внутрішнє дифузійно-кінетичне відношення, внутрішній критерій Семенова, що визначає всередині пор відношення швидкості реагування кисню до його масопереносу;  $D_v$  – коефіцієнт дифузії кисню всередині пор, м<sup>2</sup>/с;  $F_v$  – питома поверхня пор (загальна поверхня пор в одиниці об'єму частинки), м<sup>-1</sup>.

### 3. Залежність густини частинки від її діаметра

Коефіцієнт внутрішньої дифузії і питомої поверхні пор залежать від характеристик внутрішньої структури і морфології частинки. Для врахування об'ємної дифузії і дифузії Кнудсена кисню в пористій структурі частинки можна використати ефективний коефіцієнт дифузії  $D_{\text{eff}}$ , який може бути розрахований згідно з таким виразом [1, 12]:

$$\frac{1}{D_{\text{eff}}} = \frac{1}{D_g} + \frac{1}{D_K}. \quad (8)$$

Тут  $D_K$  – коефіцієнт дифузії Кнудсена для кисню, що характеризує транспорт через пори, що мають діаметри менше довжини вільного пробігу кисню:

$$D_K = \frac{2}{3} r_p \bar{u}, \quad r_p = 2 \frac{\chi}{F_v}, \quad (9)$$

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu_{O_2}}}, \quad \chi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{тр}}},$$

де  $r_p$  – середній радіус пор, м;  $\bar{u}$  – швидкість теплового руху молекул кисню, м/с;  $\chi$  – поруватість частинки;  $\rho_{\text{тр}}$  – густина суцільної речовини частинки (дійсна густина), кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – звивистість пор.

Вираз для коефіцієнта дифузії Кнудсена  $D_K$  заснований на кінетичній теорії дифузії газів у прямій циліндричній порі [12]. Для опису дифузії кисню всередині пор  $D_v$  використовується залежність [1, 12]:

$$D_v = \frac{\chi}{\tau} D_{\text{eff}}. \quad (10)$$

Коефіцієнт звивистості  $\tau$  вводиться для обліку звивистого шляху, по якому кисень повинен дифундувати, впливу перетину окремих пор і різних невідомих ступенів анізотропії і неоднорідності структури пор, що змінюється. Значення  $\tau = \sqrt{2}$  береться для випадково орієнтованих однорідних пор [12]. Зазвичай приймають  $\tau = 1,5$ .

Як видно з (8), середній розмір радіуса пор залежить від питомої поверхні пор  $F_v = \rho F_m$ , де  $F_m$  – питома поверхня пор в 1 кг маси коксу. Характерні значення  $F_m$  доволі різні. Так, для електродного вугілля з густиною  $\rho = 1600$ – $1700$  кг/м<sup>3</sup> вказано  $850$  м<sup>2</sup>/кг [13]. Для американського вугілля з густиною  $\rho = 900$ – $1400$  кг/м<sup>3</sup> (істинна густина  $\rho_{\text{тр}} = 1300$ – $1600$  кг/м<sup>3</sup>) питома поверхня пор  $100$ – $400$  м<sup>2</sup>/кг [12]. Для частинок sphergocarb ( $\rho = 560$  кг/м<sup>3</sup>)  $F_m = 864 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг [3]. Для нафтового вугілля маємо  $2 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг, доменного коксу менше  $0,1 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг, деревного вугілля –  $16,7 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг [14].

Найбільші пори – макропори [12, 15]. Їх радіус  $r_p > 0,5 \cdot 10^3$  Å, а відповідна їм питома поверхня  $0,5$ – $2 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг. Радіус перехідних пор  $< 8r_p < < 0,5 \cdot 10^3$  Å, а питома поверхня до  $70 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг. Мікропори мають розмір  $r_p < 8$  Å і питома поверхня мікропор  $6$ – $17 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/кг.

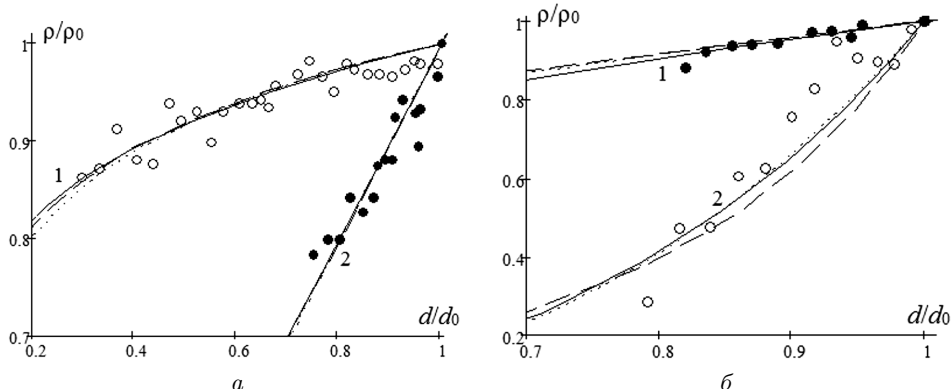
Зі збільшенням вмісту вуглецю в коксі з  $70$  до  $95\%$  монотонно збільшує частку об'єму мікропор у загальному об'ємі пор коксу з  $23\%$  до  $75\%$ , а частка об'єму макропор монотонно зменшує з  $75\%$  до  $23\%$  [12]. Частка об'єму перехідних пор досягає максимуму в  $30\%$  при вмісті вуглецю в коксі  $80\%$ .

Для застосування кнудсенівської дифузії необхідне виконання умови для числа Кнудсена  $Kn = = l_p/d_p \gg 1$ . Якщо врахувати температурну залежність довжини вільного пробігу  $l_p = l_{p0}T/T_0$  то, наприклад, при температурі частинки  $1500$  К маємо  $l_p = 0,35$  мкм.

Для характерних значень пористості антрацити  $\chi = 0,1$  і питомої поверхні пор  $F_v = 1,5 \times \times 10^6$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> маємо, згідно з (8), середній радіус пор  $r_p = 0,13$  мкм ( $d_p = 0,26$  мкм). Отже режим кнудсенівської дифузії може виконуватися для значень  $F_v > 10^7$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Величина коефіцієнта внутрішньої дифузії  $D_v$  виходить близько  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, що узгоджується з даними, приведеними в [19].

Таким чином, для кнудсенівської дифузії маємо  $D_v F_v = \frac{4}{3} \frac{\bar{u}}{\tau} \chi^2$ , що приводить до незалежності константи внутрішнього реагування в явному вигляді від питомої поверхні пор. Рівняння (5) в результаті приводиться до вигляду, аналогічно як і [6, 7]:

$$\frac{d \partial \rho}{\rho \partial d} = \alpha_0 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{тр}}} \right). \quad (11)$$



Залежності густини частинки коксу від її діаметра при її горінні:  $\circ$  – нафтовий кокс [2];  $\bullet$  – spherical carb [3] (а). Деревне вугілля (б):  $\bullet$  –  $\rho_0 = 450 \text{ кг/м}^3$ ,  $\circ$  –  $\rho_0 = 350 \text{ кг/м}^3$ . Розрахункові залежності: — (1),  $\cdots$  (12), --- (16)

Розв’язок (11) вдається представити у вигляді:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(d/d_0)^{\alpha_0}}{1 - (1 - (d/d_0)^{\alpha_0}) \cdot \rho_0/\rho_{tr}}, \quad (12)$$

$$\alpha_0 = 3\sqrt{\frac{4\bar{u}}{3\tau} \frac{1}{k_1 + k_2}},$$

де  $d_0$ ,  $\rho_0$  – початкові значення діаметра і густини частинки. Тут коефіцієнт  $\alpha_0$  визначається через величину звивистості пор, температуру частинки, а також кінетичними параметрами хімічного реагування. Особливістю отриманої залежності є те, що  $\alpha_0$  в цьому випадку не залежить від питомої поверхні пор.

При невисоких значеннях питомої поверхні пор [13]  $D_{\text{eff}} \approx D_g$  і коефіцієнт внутрішньої дифузії кисню пропорційний коефіцієнту молекулярної дифузії:

$$D_v = \frac{\chi}{\tau} D_g, \quad D_g = D_{g0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n+1} \frac{P_0}{P}. \quad (13)$$

Залежність питомої поверхні пор від пористості частинки [13]:

$$F_v = F_{v0} \frac{\chi(1-\chi)}{\chi_0(1-\chi_0)}, \quad (14)$$

де  $F_{v0}$  і  $\chi_0$  – початкова питома поверхня пор і пористість.

Підстановка (13), (14) в (5) і (7) приводить до рівняння

$$\frac{d}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial d} = \alpha_1 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{tr}}\right) \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{tr}}}, \quad (15)$$

$$\alpha_1 = 3\sqrt{\frac{D_g F_{v0}}{\chi_0(1-\chi_0)\tau(k_1+k_2)}}.$$

Його розв’язок

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^{\alpha_1} = \frac{\left(1 + \sqrt{\rho/\rho_{tr}}\right) \left(1 - \sqrt{\rho_0/\rho_{tr}}\right)}{\left(1 + \sqrt{\rho_0/\rho_{tr}}\right) \left(1 - \sqrt{\rho/\rho_{tr}}\right)} \times \exp\left(2\sqrt{\frac{\rho_{tr}}{\rho_0}} - 2\sqrt{\frac{\rho_{tr}}{\rho}}\right). \quad (16)$$

В цьому випадку коефіцієнт  $\alpha_1$  залежить явно від питомої поверхні пор.

#### 4. Обговорення і аналіз результатів

Таким чином маючи експериментальні дані густини частинки коксу від її діаметра неважко визначити експериментальний показник степеня  $\alpha$  для залежності (1). Наступним кроком є графічне порівняння залежностей (12) та (16) з (1) і визначення відповідних показників степеня  $\alpha_0$  та  $\alpha_1$ , при яких спостерігається найбільш задовільне узгодження.

На рисунку зображені результати обробки експериментальних даних для частинок коксів та деревного вугілля, параметри яких наведені в

Таблиця 1. Параметри коксів на отримані значення показників степеня

Вид коксу	$E_1$ , кДж/моль	$T_{\text{вуг}}$ , К	$d_0$ , мкм	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$	$\alpha_0$	$\alpha_0$ по (17)	$\alpha_1$
Нафтовий кокс	82,7	2000	85	1400	0,125	0,353	0,169	0,43
Spheroscarb	84,0	1800	140	450	1	1,25	1,19	2,9
Деревне вугілля – 1	75,0	1200	13200	450	0,45	0,55	0,50	1
Деревне вугілля – 2	75,0	1200	11200	350	4	4,5	4,35	15

табл. 1. Результати для деревного вугілля були отримані за методикою [9]. Частинки деревного вугілля нагрівалися в печі до температури 600–650 К, при якій після видалення її з печі частинка запалювалася і горіла в повітрі кімнатної температури. Частинка розташовувалася на металевому підвісі, що кріпився на мікрометричних вагах. Діаметр частинки в часі визначався за допомогою методу цифрової мікроскопії.

Отримані значення показників степенів вказані в табл. 1. Звертає на себе увагу суттєва їх відмінність між собою.

В роботі [6] приведено порівняння показників степенів  $\alpha$  та  $\alpha_0$ . Автором [6] запропонована апроксимуюча залежність для оцінки величини  $\alpha_0$  у вигляді:

$$\alpha_0 = \alpha \left( 1 + 0,25 \frac{\rho_0}{1000} \right). \quad (17)$$

Однак значення, отримані по залежності (17), суттєво відрізняються від отриманих нами. Так, для згідно з (17) для нафтового коксу маємо  $\alpha_0 = 0,169$ , для spheroscarb –  $\alpha_0 = 1,12$ , а для деревного вугілля – 0,50 та 4,35.

Для оцінки параметрів внутрішньої структури вугілля розглянемо задачу ізотермічного вигорання частинки коксу, в результаті якого відбувається зміна діаметра і густини частинки. Для цього необхідно вирішити чисельним чином задачу (5) в загальному випадку (врахування (6) та (8)). Дане рівняння вирішується методом Коші. Для кожного виду коксу знаходилася питома поверхня пор  $F_{v0}$  (табл. 2), при якій графічно розв'язок задачі (5) узгоджувався з емпіричною залежністю (1). Це необхідно було для виявлення переважного механізму дифузії всередині пор по порівнянню ефективного коефіцієнта дифузії кисню з коефіцієнтами дифузії Кнудсена і об'ємної в газі.

Таблиця 2. Параметри коксів на отримані значення показників степеня

Вид коксу	$F_{v0}$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$F_{m0}$ , м <sup>2</sup> /кг	$Se_{v0}$	$D_{\text{eff}}/D_g$
Нафтовий кокс	$1,2 \cdot 10^4$	8,5	13,5	0,909
Spheroscarb	$2,5 \cdot 10^5$	530	51	0,987
Деревне вугілля – 1	$2,4 \cdot 10^4$	44	778	0,996
Деревне вугілля – 2	$2,0 \cdot 10^6$	5710	7390	0,749

В результаті визначався, який з аналітичних розв'язків (12) чи (16) можна використовувати для подальшого аналізу.

Для всіх вказаних типів вугілля спостерігається об'ємна дифузія. Тому по отриманому значенні показника степеня  $\alpha_1$  можна визначити питому поверхню пор (табл. 2), яка узгоджується зі значенням, взятій при чисельному розв'язку точної моделі (5).

Отримані значення питомої поверхні пор у цілому на 1–3 порядки менші, ніж отримані методами ВЕТ чи D-R. Це пояснюється тим, що при горінні частинки коксу задіяна лише частина всієї поверхні пор безпосередньо біля зовнішньої поверхні. Тому отримані значення питомої поверхні пор можна вважати ефективними.

## 5. Висновки

Отже, для певної області горіння (високе значення внутрішнього дифузійно-кінетичного відношення  $Se_v > 5$ ) вдається аналітично визначити зв'язок між густиною і діаметром. Так, при описі дифузії кисню всередині пор через кнудсенівську дифузію вдається отримати вираз, що описує аналітично залежність густини частинки і діаметра при її горінні, куди входить комплекс відносного діаметра в степені  $\alpha_0$ . Аналогічний результат вдається отримати і в припущенні молекулярної дифузії кисню

всередині пор частинок коксу. Аналітично отримані складні степеневі залежності якісно відрізняються від емпірично отриманої степеневі залежності  $\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\alpha$ , з якою їх можна графічно порівняти. Отримані показники степенів можна використати для оцінки значення ефективної питомої поверхні пор коксу вугілля.

1. U. Kleinhans, S. Halama, H. Spliethoff. Char particle burning behavior: Experimental investigation of char structure evolution during pulverized fuel conversion. *Fuel Process. Technol.* **171**, 361 (2017).
2. I.W. Smith. The combustion rates of coal chars. *Symp. Combust.* **19**, 1045 (1982).
3. B.J. Waters, R.G. Squires, N.M. Laurendeau. Evidence for formation of CO<sub>2</sub> in the vicinity of burning pulverized carbon particles. *Combust. Flame* **74**, 91 (1988).
4. L. Ma. *Combustion and Gasification of Chars in Oxygen and Carbon Dioxide at Elevated Pressure*. Ph.D. thesis (Stanford University, 2006).
5. N.E.L. Haugen, M.B. Tilghman, R.E. Mitchell. The conversion mode of a porous carbon particle during oxidation and gasification. *Combust. Flame* **161**, 612 (2014).
6. R.H. Essenhigh. Influence of initial particle density on the reaction mode of porous carbon particles. *Combust. Flame* **99**, 269. (1994).
7. R.H. Essenhigh. An integration path for the carbon-oxygen reaction with internal reaction. *Symp. Combust.* **22**, 89 (1989).
8. M.A. Field. Measurements of the effect of rank on combustion rates of pulverized coal. *Combust. Flame* **14**, 237 (1970).
9. А.С. Черненко. Зажигание и горение частиц древесного угля в холодных азотно-кислородных смесях комнатной

температуры. Часть I. Экспериментальные исследования. *Физика аэродисперсных систем* **51**, 67 (2014).

10. V.V. Kalinchak, A.S. Chernenko, M.N. Korchagina. Modified constant of combustion of porous coal particles. *J. Eng. Phys. Thermophys.* **92**, 1. (2019).
11. В.В. Померанцев. *Основы практической теории горения* (Энергоатомиздат, 1986).
12. N.M. Laurendeau. Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion. *Progr. Energy. Combust. Sci.* **4**, 221 (1978).
13. Е.С. Головина. *Высокотемпературное горение и газификация углерода*. (Энергоатомиздат, 1983).
14. Г.А. Ульява. *Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов*. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Екатеринбург. (2013).
15. М.М. Дубинин. *Адсорбция и пористость* (ВАХЗ, 1972).

Одержано 14.02.20

О.С. Черненко, В.В. Калинин, А.П. Батуріна

#### EVALUATION OF THE POROSITY OF A COKE PARTICLE ACCORDING TO ITS COMBUSTION DATA

#### S u m m a r y

The dependence of the density of a porous coke particle on its diameter at the particle combustion in the external diffusion mode is analyzed. It is shown that, for the large values of the internal diffusion-kinetic ratio,  $Se_v > 5$ , the required dependence can be obtained in the analytic form. The analytic formulas are found to be different for the bulk and Knudsen diffusion modes inside the pores. A graphical comparison of the obtained dependences with the empirical power-law dependence is carried out to evaluate the power exponents in the analytic dependences. The corresponding results make it possible to evaluate the effective specific surface area of the pores.