

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 пиловугільного факела [5]. В основному частинки горять зі зменшенням густини і діаметра з різними показниками α в залежності від зовнішніх умов.

Як параметр, що дозволяє встановити режим горіння частинки [6, 7], використовується коефіцієнт ефективності η . 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 α 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 ρ_{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 ; ρ_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 α :

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

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 χ 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, м²/с; F_v – питома поверхня пор (загальна поверхня пор в одиниці об'єму частинки), м⁻¹.

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_{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; χ – поруватість частинки; $\rho_{\text{тр}}$ – густина суцільної речовини частинки (дійсна густина), кг/м³; τ – 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 τ 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/м³ вказано 850 м²/кг [13]. Для американського вугілля з густиною $\rho = 900$ – 1400 кг/м³ (істинна густина $\rho_{\text{тр}} = 1300$ – 1600 кг/м³) питома поверхня пор 100 – 400 м²/кг [12]. Для частинок sphergocarb ($\rho = 560$ кг/м³) $F_m = 864 \cdot 10^3$ м²/кг [3]. Для нафтового вугілля маємо $2 \cdot 10^3$ м²/кг, доменного коксу менше $0,1 \cdot 10^3$ м²/кг, деревного вугілля – $16,7 \cdot 10^3$ м²/кг [14].

Найбільші пори – макропори [12, 15]. Їх радіус $r_p > 0,5 \cdot 10^3$ Å, а відповідна їм питома поверхня $0,5$ – $2 \cdot 10^3$ м²/кг. Радіус перехідних пор $< 8r_p < < 0,5 \cdot 10^3$ Å, а питома поверхня до $70 \cdot 10^3$ м²/кг. Мікропори мають розмір $r_p < 8$ Å і питома поверхня мікропор 6 – $17 \cdot 10^5$ м²/кг.

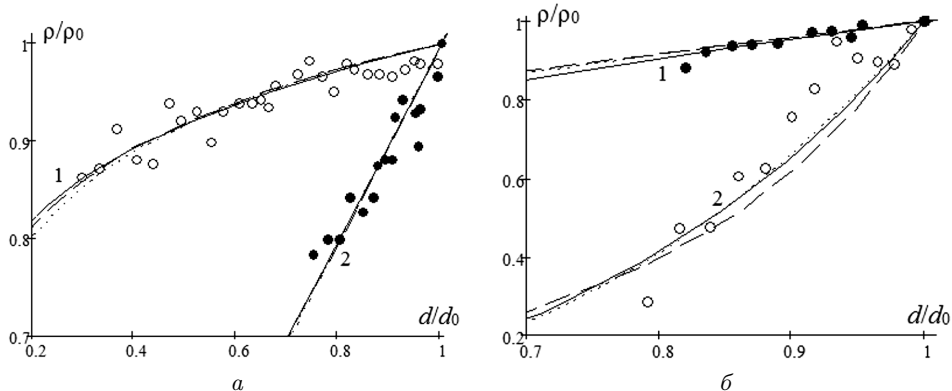
Зі збільшенням вмісту вуглецю в коксі з 70 до 95% монотонно збільшує частку об'єму мікропор у загальному об'ємі пор коксу з 23% до 75% , а частка об'єму макропор монотонно зменшує з 75% до 23% [12]. Частка об'єму перехідних пор досягає максимуму в 30% при вмісті вуглецю в коксі 80% .

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 $F_v = 1,5 \times 10^6$ м²/м³ 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 $F_v > 10^7$ м²/м³. Величина коефіцієнта внутрішньої дифузії D_v виходить близько 10^{-6} – 10^{-7} м²/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 , ρ_0 – початкові значення діаметра і густини частинки. Тут коефіцієнт α_0 визначається через величину звивистості пор, температуру частинки, а також кінетичними параметрами хімічного реагування. Особливістю отриманої залежності є те, що α_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 χ_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 α_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 α для залежності (1). Наступним кроком є графічне порівняння залежностей (12) та (16) з (1) і визначення відповідних показників степеня α_0 та α_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	ρ_0 , кг/м ³	α	α_0	α_0 по (17)	α_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 α та α_0 . Автором [6] запропонована апроксимуюча залежність для оцінки величини α_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 ² /м ³	F_{m0} , м ² /кг	Se_{v0}	D_{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 α_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 BET 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 α_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 CO₂ 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. Laurendeal. 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.