

УДК. 662.6, 667

Черненко О.С., Калінчак В.В., Батуріна А.П.
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Особливості вигорання поруватих частинок коксу вугілля

Проводиться порівняння емпіричних і теоретичних залежностей густини частинки коксів від її діаметру при її горінні. На відміну від усталених уявлень, що всередині частинки в порах кисень дифундує переважно кнудсенівською дифузією, при порівнянні з чисельними розрахунками показано, що всередині пор повинна відбуватися переважно об'ємна дифузія. Кисень не встигає потрапляти всередину перехідних і мікропор. Для певної області горіння (високе значення внутрішнього дифузійно-кінетичного відношення $Se_v > 5$) отримано аналітичний вираз, що описує зв'язок між густиною і діаметром частинки в припущенні молекулярної дифузії кисню всередині пор частинок коксу. Показано, що, при горінні частинок вугільного пилу з діаметром менше 150 мкм значення Se_v можуть бути менші за 5.

По визначеному показнику степеня в отриманій залежності можна визначити значення ефективної питомої поверхні пор коксу вугілля.

Ключові слова: частинка коксу, горіння, густина, діаметр, питома поверхня пор

Вступ. Дослідження складного процесу тепломасообміну і кінетики горіння частинок вугілля представляє собою цілий ряд ускладнень. Так в роботі [1] узагальнюється широкий спектр науково-дослідних методологій, які були створені для вивчення горіння окремих частинок вугілля з метою розробки знань про вугільні технології. Метою експериментів було всебічне вивчення процесів, в яких частинки вугілля зазнають змін при високих температурах. Як правило, це зводиться до вивчення характеристики явища займання частинок і стадійності горіння частинок. В цілому вид палива, розмір, умови згорання, зокрема температура горіння, роблять сильний вплив на режим згорання. Однак часто дані, що представлені різними дослідниками, не завжди узгоджуються між собою. Ці відмінності часто є наслідком недоліків самої методології дослідження. Більшість робіт фокусуються на дослідженні кінетики, визначенні температури горіння та займання в залежності від параметрів процесу та діаметру частинок.

При цьому не визначаються кількісно такі параметри, як густина частинок, поруватість, питома поверхня пор та їх зміна в процесі вигорання. В роботах [2, 3] звертається увага на взаємозв'язок зміни густини і діаметра частинки в процесі горіння поруватих частинок вугілля. При цьому, не зважаючи на те, що є великий розкид і аналіз горіння кожного вугілля необхідно розглядати індивідуально, зазвичай залежність зміни маси, густини і діаметру частинки можна апроксимувати степеневою залежністю

$$\rho/\rho_0 = (d/d_0)^\alpha, \quad \rho/\rho_0 = (m/m_0)^\beta, \quad d/d_0 = (m/m_0)^\gamma. \quad (1)$$

Аналітично отримати дані рівняння можна з аналізу кінетики реагування поруватої частинки в припущенні внутрішньо-дифузійній області реагування та незмінності параметрів реагування в порах [4]. Це означає, що густина і діаметр

змінюються з втратою маси на ранніх стадіях горіння так, як на пізніх стадіях.

Однак, коли частинки горять, дифузійний опір пор зменшується, оскільки закриті пори відкриваються і пори зливаються і зливаються. Тоді як на ранніх стадіях горіння втрата маси обмежується перш за все зовнішньою периферією частинок, на пізніх стадіях втрата маси відбувається по всьому обсязі частинок. Таким чином, очевидно, що функціональна залежність між ступенем втрати маси, розміром і густиною частинок змінюються в процесі горіння.

В роботах [3, 5] аналітично отримані функціональні залежності густини, маси і діаметра частинки з врахуванням зміни в процесі її горіння параметрів внутрішньої структури.

Ессенхай [3] розширив приведений вище аналіз, щоб показати, що відношення β/γ змінюється залежно від початкової густини вугілля. Був зроблений висновок, що відмінності в швидкості реагування різних коксів вугілля можуть бути пов'язані більше з відмінностями в фізичному доступі до зовнішньої і внутрішньої частини частинок, ніж із-за хімічної активності. Початкова густина коксів може розглядатися як міра доступності до внутрішньої частинки.

Як параметр, що дозволяє встановити режим горіння частинки [3, 6] всередині пор, використовується коефіцієнт ефективності η . Він визначається відношенням ефективною швидкості реакції з урахуванням масопереносу окислювача до швидкості хімічної реакції:

$$\eta = (1 + Se)^{-1}, \quad Se = \frac{k_{\Sigma}}{D_g Sh} d.$$

Його значення змінюється в межах $0 < \eta < 1$ і залежить від морфології матеріалу частинки, діаметру і питомої поверхні пор. Як правило, підвищення поруватості частинки, питомої поверхні і діаметру пор приводить до збільшення швидкості її 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 частинки ($\eta = 0$) і концентрація окислювача всередині частинки близька до нуля. Тому густина частинки в процесі горіння залишається незмінною, а діаметр зменшується.

Саме дослідження проміжних режимів, для яких $0 < \eta < 1$, залишається найбільш цікавим, коли в процесі горіння зменшуються густина і діаметр частинки. Для встановлення таких режимів окислення зазвичай знижують концентрацію кисню в суміші (наприклад, до 5-10 об. %) [7] або температуру суміші [8]. Тоді температури горіння частинок помітно знижуються.

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

1. Постановка задачі. Зменшення діаметру частинки обумовлене хімічними реакціями $C + O_2 = CO_2(I)$ і $2C + O_2 = 2CO (II)$ на її зовнішній поверхні, а зменшення густини частинки – протіканням реакцій всередині пор. Їх зменшення з часом представляється у вигляді [9]:

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

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

$$k_\Sigma = k_1 + k_2 + k_v + U_s, \quad d(t=0) = d_b, \quad \rho(t=0) = \rho_b.$$

Тут ρ_{gs} – густина навколишнього газу біля поверхні частинки, кг/м^3 ; M_C, M_{O_2} – молярні маси вуглецю і кисню, кг/моль ; k_1, k_2 – константи швидкостей хімічних реакції (I) – (II); k_v – ефективна константа внутрішнього реагування; Y_{O_2} – відносна масова частка кисню в газі, D_g – коефіцієнт дифузії кисню в газі, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_b – початкова густина частинки, кг/м^3 , X_A – масова частка золи в вугіллі.

Розділивши один на одне вирази (2) і (3), отримаємо диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial \rho}{\partial d} = 3 \frac{\rho}{d} \frac{k_v}{k_1 + k_2}. \quad (4)$$

Особливістю цього рівняння є те, що воно справедливе незалежно від зовнішнього режиму протікання реакції (визначається числом Se): кінетичного, проміжного чи дифузійного.

В загальному випадку константа внутрішнього реагування визначається кінетикою хімічних реакції, діаметром і поруватістю частинки χ та питомою поверхнею пор F_v [10]:

$$k_v = \frac{2D_v}{d} (Se_v cth Se_v - 1), \quad Se_v = \sqrt{\frac{F_v d^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}}, \quad (5)$$

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, $\text{м}^2/\text{с}$; F_v – питома поверхня пор (загальна поверхня пор в одиниці об'єму частинки), м^{-1} .

Використання виразу (5) не дозволяє в аналітичному вигляді визначити залежність $\rho(d)$ з розв'язку (4). При значенні критерію $Se_v \geq 5$ константа внутрішнього реагування не залежить від її зовнішнього діаметру частинки:

$$k_v = \sqrt{D_v F_v (k_1 + k_2)}, \quad (6)$$

Саме цей вираз береться за основу [2, 3, 5] в подальшому аналітичному розв'язку рівняння (4).

Якщо припустити, що коефіцієнт внутрішньої дифузії і питома поверхня пор не залежать від густини частинки, то величина $k_v = \text{const}$ і, після інтегру-

вання (4), отримуємо залежність виду (1), де

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

Для опису дифузії кисню всередині пор використовується залежність [2]:

$$D_v = \frac{\chi}{\tau} D_{eff}, \quad \frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{D_g} + \frac{1}{D_K}. \quad (7)$$

Тут D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії кисню в пористій структурі частинки, який враховує об'ємну дифузію і дифузію Кнудсена; D_g – коефіцієнт молекулярної об'ємної дифузії; D_K – коефіцієнт дифузії Кнудсена, що характеризує транспорт через пори; χ – поруватість частинки; τ – коефіцієнт звивистості пор (для випадково орієнтованих однорідних пор $\tau = \sqrt{2}$ [11]).

Вираз для коефіцієнта дифузії Кнудсена D_K заснований на кінетичній теорії дифузії газів в прямій циліндричній порі [2, 11]:

$$D_K = \frac{2}{3} r_p \bar{u}, \quad r_p = 2 \frac{\chi}{F_v}, \quad \bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu_{O_2}}}, \quad \chi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{tr}}, \quad (8)$$

де r_p – середній радіус пор, м; \bar{u} – швидкість теплового руху молекул кисню, м/с; ρ_{tr} – густина суцільної речовини частинки (дійсна густина), кг/м³.

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

$$\frac{d}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial d} = \alpha_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{tr}} \right).$$

Його розв'язок вдається представити у вигляді:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(d / d_0)^{\alpha_0}}{1 - \left(1 - (d / d_0)^{\alpha_0} \right) \cdot \rho_0 / \rho_{tr}}, \quad \alpha_0 = 3 \sqrt{\frac{4 \bar{u}}{3 \tau} \frac{1}{k_1 + k_2}}. \quad (9)$$

де d_0, ρ_0 – початкові значення діаметру 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.

В припущенні тільки молекулярної дифузії всередині пор $D_{eff} \approx D_g$ маємо:

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

Залежність питомої поверхні пор від пористості частинки [12]:

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

де F_{v0} і χ_0 – початкова питома поверхня пор і пористість.

В результаті рівняння (4) набуває вигляду:

$$\frac{d}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial d} = \alpha_1 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{tr}} \right) \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{tr}}}, \quad \alpha_1 = 3 \sqrt{\frac{D_g F_{v0}}{\chi_0 (1 - \chi_0) \tau (k_1 + k_2)}}. \quad (10)$$

Його розв'язок

$$\left(\frac{d}{d_0} \right)^{\alpha_1} = \frac{(1 + \sqrt{\rho / \rho_{tr}})(1 - \sqrt{\rho_0 / \rho_{tr}})}{(1 + \sqrt{\rho_0 / \rho_{tr}})(1 - \sqrt{\rho / \rho_{tr}})} \cdot \exp \left(2 \sqrt{\frac{\rho_{tr}}{\rho_0}} - 2 \sqrt{\frac{\rho_{tr}}{\rho}} \right). \quad (11)$$

В цьому випадку коефіцієнт α_1 залежить явно від питомої поверхні пор.

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. Згідно (8) режим кнудсенівської дифузії може виконуватися для значень $F_v > F_{v.k} = 10^7$ м²/м³.

В роботах [2,3,5,6] приймається саме дифузія Кнудсена всередині пор, опираючись на доволі високі значення питомої поверхні пор та малі значення середнього радіусу пор. Однак не доводиться чи дійсно реалізуються всі прийняті припущення.

2. Аналіз результатів. Значення питомої поверхні пор одиниці об'єму $F_v = \rho F_m$ чи маси F_m коксу доволі різні і зазвичай визначаються методами ВЕТ (Брунер, Еммет та Теллер), ртутної порометрії чи D-R(Дубинін, Радущкевич). Так для електродного вугілля з густиною $\rho = 1600 \div 1700$ кг/м³ вказано 850 м²/кг [12]. Для американського вугілля з густиною $\rho = 900 \div 1400$ кг/м³ ($\rho_{tr} = 1300 \div 1600$ кг/м³) питома поверхня пор 100 ÷ 400 м²/кг [11]. Для нафтового вугілля маємо 2·10³ м²/кг, доменного коксу менше 0.1·10³ м²/кг, деревного вугілля – 16.7·10³ м²/кг [13].

Радіус пор, як видно з (8) обернено пропорційний питомій поверхні пор. Прийнято [11, 14], радіус макропор $r_p > 0.5 \cdot 10^3$ Å, а відповідна їм питома поверхня 0.5-2·10³ м²/кг. Радіус перехідних пор $8 < r_p < 0.5 \cdot 10^3$ Å, а питома їх поверхня до 70·10³ м²/кг. Мікропори мають розмір $r_p < 8$ Å і питома їх поверхня мікропор 6 – 17 10⁵ м²/кг.

Отже, параметром, який визначає характер дифузії через порівняння радіусу пор і довжини вільного пробігу молекул (число Кнудсена), є питома поверхня пор. Тому в подальшому для кожного виду коксу знаходилася питома поверхня пор F_{v0} , при якій графічно розв'язок загальної задачі (4), (5), (7) ізотермічного вигорання частинки коксу методом Коші [4] узгоджувався з емпіричною залежністю (1).

В табл. 1 приведені вихідні та розрахункові дані для ряду частинок різних коксів [15-20]. Відмінністю результатів цих досліджень серед великої кількості аналогічних даних, які узагальнюються в роботах [2, 3], є наявність залежностей типу (1) без використання насипної густини для вугільного пилу. А, як відомо, ця густина значно відрізняється від середньої густини частинок. В основ-

Табл. 1. Параметри коксів на отримані значення показників степеня

	Xieu [15]	Young [16]	Waters [17]	Wall [18]	Smith [19]	Monson [20]	Szekely [21]
ρ_0 , кг/м ³	650	1750	470	1300	1400	650	1120
d_0 , мкм	60	85	140	100	85	70	735
T , К	1700	1700	1800	1900	2000	1900	1700
ρ_{tr} , кг/м ³	1600	2250	1600	1600	2250	1600	1820
E , кДж/моль	80	125	84	130	83	252	120
Se_{v0}	6.2	2.2	4.6	4.8	1.4	1.9	38.4
D_{eff}/D_g	0.89	0.97	0.99	0.95	0.97	0.87	0.92
F_{v0} (расч), м ² /м ³	$25 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$
F_{m0} (расч), м ² /кг	384	11	64	23	2.8	384	107
α (експ)	3	0.67	1.0	1.0	0.125	5.6	4.0
α_0 (апрок)	4.5	2.5	1.25	3.5	0.35	8	8.0
α_1 (апрок)	9.0	2.8	2.9	4.0	0.43	14	11.0
α_1 (расч)по (10)	10.2	6.0	3.6	5.7	1.4	38.6	11.9

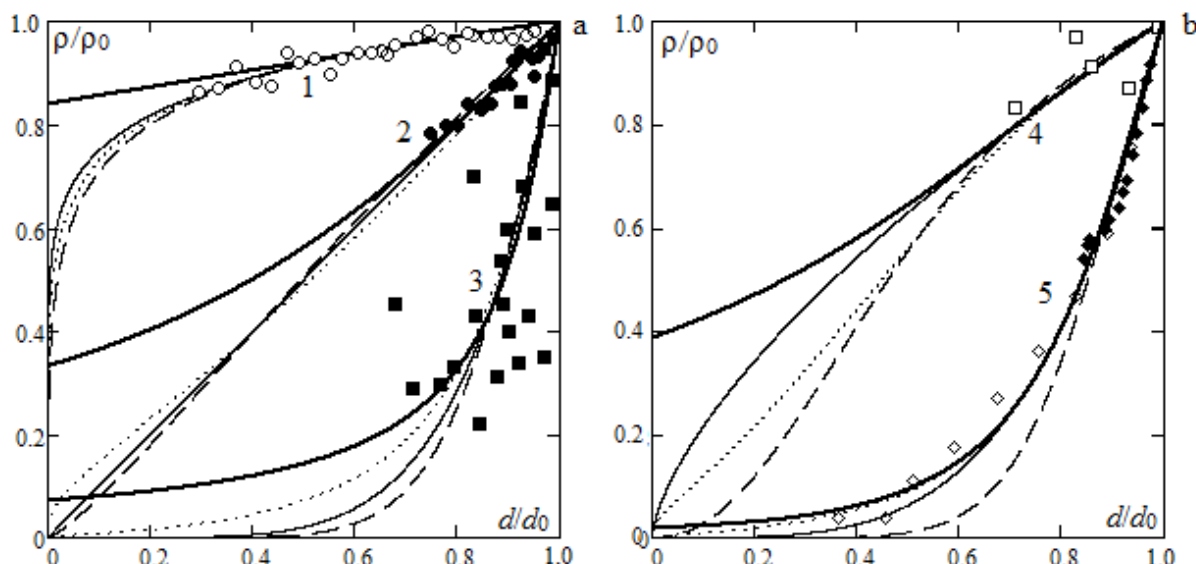


Рис. 1. Залежності густини частинки коксу від її діаметру при її горінні: 1) \circ , Smith [19], 2) \bullet , Waters [17], 3) \blacksquare , Monson [20], 4) \square , Young [16], 5) \blacklozenge , Szekely [21]. Розрахункові залежності: — – розв'язок (4), (5), (7); --- – (1), - - - – (9), \cdots – (11).

ному результати представлені при високих температурах (1200 – 2200 К) і для дрібних частинок (від 10 до 100 мкм).

Для визначення кінетичних констант хімічних реакцій (I) та (II) використовуємо зв'язок енергії активації та перед експонентного множника для різних реакцій ($k_* = 100$ м/с і $T_* = 2600$ К)[10]:

$$k_i = k_{0i} \exp(-E_i/RT), \quad k_{0i} = k_* \exp(E_i/RT_*), \quad E_2 = 1.1E_1, \quad i = 1, 2.$$

Звертає увагу (табл. 1), що підібрані значення питомої поверхні пор F_{v0} значно менші за $F_{v,k}$. Це говорить про переважання об'ємної дифузії в порах, що додатково показує і близькість відношення D_{eff}/D_g до одиниці.

Отримані значення питомої поверхні пор в цілому на 1-3 порядки менші, ніж отримані методами ВЕТ чи D-R. Це можна пояснити тим, що при горінні

частинки коксу кисень не встигає проникнути всередину перехідних і мікропор. Таким чином задіяною залишається лише частина всієї поверхні пор і безпосередньо біля зовнішньої поверхні. Тому отримані значення питомої поверхні пор можна вважати ефективними.

Експериментальні дані (рис.1) можна описати залежностями (9) та (11), для яких коефіцієнти α_0 та α_1 приведені в табл.1. Кожна з них отримана в припущенні дифузії Кнудсена чи об'ємної дифузії кисню в порах. Однак, другою умовою їх використання є виконання $Se_v > 5$.

З табл. 1 видно, що для частинок вугільного пилу діаметром до 150 мкм переважно $1 < Se_v < 5$. Це в принципі ставить питання в можливість застосовувати для опису результатів експерименту залежності (9) та (11). Однак, при значеннях Se_v , близьких до 5, розрахунок коефіцієнту α_1 по формулі (10) дав задовільно узгодження. Це дає можливість вирішувати обернену задачу: визначити питому поверхню пор по коефіцієнту α_1 [4].

Для більш великих частинок, наприклад агломератів частинок пилу [21], величина $Se_v > 5$ і цей підхід справедливий.

Висновки. В результаті порівняння емпіричних і теоретичних залежностей густини від діаметру частинки коксів при її горінні, а також чисельних розрахунків, показано, що всередині пор відбувається переважно об'ємна дифузія. Кисень не встигає потрапляти всередину перехідних і мікропор. Для певної області горіння (високе значення внутрішнього дифузійно-кінетичного відношення $Se_v > 5$) отриманий вираз, що описує аналітично зв'язок між густиною і діаметром частинки в припущенні молекулярної дифузії кисню всередині пор частинок коксу. Однак, для частинок вугільного пилу діаметром менше 150 мкм при їх горінні значення Se_v можуть бути менші за 5.

По визначеному показнику степеня в отриманій залежності можна визначити значення ефективної питомої поверхні пор коксу вугілля.

Література:

1. *E. Marek, K. Stańczyk* Case studies investigating single coal particle ignition and combustion// *Journal of Sustainable Mining*. – Vol. 12 (2013), No. 3, pp. 17–31
2. *Ulrich Kleinhans, Stefan Halama, Hartmut Spliethoff* // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – Vol. 171. – P. 361-373.
3. *Essenhigh R. H.* Influence of initial particle density on the reaction mode of porous carbon particles // *Combustion and flame*. – 1994. – Vol. 99. – P. 269-279.
4. *Черненко О.С., Калінчак В.В., Батуріна А.П.* Оцінка поруватості частинки коксу вугілля по даним її вигорання // *Український фізичний журнал*. – 2020. (в друку).
5. *Liqiang Ma* Combustion and gasification of chars in oxygen and carbon dioxide at elevated pressure // dissertation for the degree of doctor of philosophy. – 2006. // [researchgate.net/publication/35884451](https://www.researchgate.net/publication/35884451).
6. *Essenhigh R.H.* An integration path for the carbon-oxygen reaction with internal reaction // *Symposium (International) on Combustion*. – 1989. – Vol. 22 (1) . – P.

- 89–96.
7. *Field M.A.* Measurements of the effect of rank on combustion rates of pulverized coal // *Combust. Flame.* – 1970. – Vol. 14 (2). – P. 237–248.
 8. *Черненко А.С.* Зажигание и горение частиц древесного угля в холодных азотно-кислородных смесях комнатной температуры. Часть I. Экспериментальные исследования // *Физика аеродисперсных систем.* – 2014. – № 51. – С. 67-72.
 9. *Kalinchak V. V., Chernenko A. S. and Korchagina M. N.* Modified constant of combustion of porous coal particles // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2019. – Vol. 92, №. 1, January
 10. Основы практической теории горения // под. ред. *В.В. Померанцева.* – Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
 11. *Laurendeal N.M.* Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion // *Progress in Energy and Combustion Science.* –1978. – Volume 4, Issue 4. – P. 221-270.
 12. *Головина Е. С.* Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
 13. *Ульева Г.А.* Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов // автореф. дисс. канд. техн. наук. 2013, Екатеринбург. – 24 с.
 14. *Дубинин М. М.* Адсорбция и пористость. – М., ВАХЗ: 1972. – 128 с.
 15. *Xieu D. V., Masuda T., Cogoli G., Essenhigh, R. H.* A mathematical model of a one-dimensional char flame: a comparison of theory and experiment // *Proc. 18th. Symp. (Internat.) on Combustion* // *Comb. Institute, Pitts. PA., 1981.* – P. 1461-1468.
 16. *Young B. C., Smith I. W.* The kinetics of combustion of petroleum coke particles at 1000 to 1800 K: the reaction order // *Proc. 18th. Symp. (Internat.) on Combustion* // *Comb. institute, Pitts. PA., 1981.* – P. 1249-1254.
 17. *Bartholomew J. Waters, Robert G. Squires and Normand M. Laurendeau* Evidence for formation of CO₂ in the vicinity of burning pulverized carbon particles // *Combustion and Flame.* – V. 74. – 1988. – P: 91-106.
 18. *Wall T. F., Tate A. G., Bailey J. G., Jeness L. G., Mitchell R. E., Hurt R. H.* The temperature, burning rates and char character of pulverised coal particles prepared from maceral concentrates // *Proc. 24nd. Symp. (Internat.) on Combustion* // *Comb. Institute, Pitts. PA., 1992.* – P. 1207-1214
 19. *Smith I.W.* The combustion rates of coal chars // *Symp. Combust.* 1982. – Vol. 19(1) – P. 1045–1065
 20. *Monson C. R., Germane G. J., Blackham A. U., Douglas Smoot L.* Char oxidation at elevated pressures // *Combustion and Flame.* – 1995. – Vol. 100(4). – P.669–683.
 21. *Szekely G. A., Turns S. R., Faeth G. M.* Effects of carbon-black properties on combustion of carbon-black slurry agglomerates // *Combustion and Flame.* – 1984. – Vol. 58. – P. 31-43.

Черненко А.С., Калинин В.В., Батурина А.П.
Особенности выгорания пористых частиц кокса угля

АННОТАЦИЯ

Проводится сравнение эмпирических и теоретических зависимостей плотности частицы кокса от её диаметра при её горении. В отличие от устоявшихся представлений, что внутри частицы в порах кислород диффундирует преимущественно кнудсеновской диффузией, при сравнении с численными расчетами показано, что внутри пор должна происходить преимущественно объемная диффузия. Кислород не успевает попадать внутрь переходных и микропор. Для определенной области горения (высокое значение внутреннего диффузионно-кинетического отношения $Se_v > 5$) получено аналитическое выражение, описывающее связь между плотностью и диаметром частицы в предположении молекулярной диффузии кислорода внутри пор частиц кокса. Показано, что при горении частиц угольной пыли с диаметром менее 150 мкм значения Se_v могут быть меньше 5.

По определенному показателю степени в полученной зависимости можно определить значение эффективной удельной поверхности пор кокса угля.

Ключевые слова: частица кокса, горения, плотность, диаметр, удельная поверхность пор

Chernenko A.S., Kalinchak V.V., Baturina A.P
Features of burning's porous coal coke particles

SUMMARY

A comparison of empirical and theoretical dependences of coke particle density on the diameter during its combustion is carried out. In contrast to the established notions that oxygen diffuses inside the particle in the pores mainly by Knudsen diffusion, in comparison with numerical calculations it is shown that mainly bulk diffusion should occur inside the pores. Oxygen does not have time to get inside the transients and micropores. For a certain combustion region (high value of the internal diffusion-kinetic ratio $Se_v > 5$), an analytical expression is obtained that describes the relationship between density and particle diameter under the assumption of molecular diffusion of oxygen within the pores of coke particles. It is shown that when burning particles of coal dust with a diameter of less than 150 μm , the values of Se_v could be less than 5.

According to a certain degree in the obtained dependence, you can determine the value of the effective specific surface area of the coke pores.

Key words: coke particle, combustion, density, diameter, specific pores surface area.