

ТЕПЛОМАСООБМІН

УДК 536.46

Орловська С.Г.

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна,
вул. Університетська, 2, 65082, e-mail: svetor25@gmail.com*

Вплив розподілу температури по вуглецевій частинці на характеристики її спалахування і горіння

В роботі проведено дослідження щодо впливу теплового потоку теплопровідністю в глибину вуглецевої частинки на характеристики її займання, горіння і згасання в нагрітому до високої температури повітрі.

Проведено фізико - математичне моделювання процесів високотемпературного тепломасообміну та кінетики паралельних хімічних реакцій на поверхні вуглецевих частинок, що дало змогу визначити період індукції, час та температуру горіння частинок, критичні діаметри, при яких відбувається їх згасання. Проведено аналіз впливу температурного градієнту вздовж радіуса частинки, визваного неодноразовим прогріванням шарів вуглецевого масиву, на ці характеристики. Дослідження виконувались для вуглецевих частинок з початковими діаметрами $0,2 \div 1$ мм для інтервалу температур газу $1200 \div 1400$ К, які зазвичай реалізуються в топкових устроях.

В результаті вивчення динаміки прогрівання частинок встановлено, що спостерігаються значні градієнти температури по радіусу частинки, як в момент займання, так і в момент її згасання. При згасанні температурні градієнти набагато вищі. Для досліджуваних інтервалів температур газу та діаметрів частинок при згасанні різниця температур центру та поверхні частинок становить в середньому $400 \div 500$ К. В момент займання частинок температура їх центру нижча за температуру поверхні на $100 \div 400$ К, і ця різниця тим більша, чим більший початковий діаметр частинки і вища температура газу. Доведено, що неврахування нерівномірності прогрівання частинок в глибину вуглецевого масиву призводить до неточності визначення основних характеристик займання і горіння для досліджуваного інтервалу діаметрів частинок: для періоду індукції - на 50%, для часу горіння від 7% до 17%, температури горіння - на 100 К, для діаметру, що характеризує згасання, приблизно на 5 мкм. Доведено на необхідність врахування температурного градієнта особливо на стадії займання частинок.

***Ключові слова:** тепломасообмін, займання, горіння, згасання, вуглецеві частинки, градієнт температури, період індукції, час горіння.*

Вступ. Перетворення вуглецевого палива при високих температурах вивчається протягом багатьох років, що має важливе значення як для теоретичних досліджень, так і для практики його спалювання та газифікації. Вугілля є найстарішим мінеральним ресурсом, що використовується як енергопостачання. Тим не менш, його спалювання має серйозні екологічні наслідки, пов'язані з викидами газів та пилу в атмосферу [1,2]. Вугілля містить значну кількість елементів, таких як сірка, азот та інші (хлор, важкі метали). Спалювання вугілля супроводжується шкідливими викидами в довкілля оксидів сірки та азоту. У зв'язку зі зростанням використання вугілля ці екологічні проблеми

стають дедалі актуальнішими. Вирішення цього завдання можливе лише з удосконаленням існуючих технологій шляхом оптимізації процесів спалювання та газифікації палива [3].

Горіння вугільного палива є складним процесом, який включає послідовні, частіше послідовно-паралельні стадії: вихід летких речовин, спалахування та горіння летких речовин [4-6], запалювання і горіння коксового залишку (вуглецю), виникнення продуктів згорання (газоподібних і твердих), які є шкідливими для навколишнього середовища. Стадія гетерогенного окислення вуглецю є основним процесом, що відбувається при високотемпературній переробці вугілля, і протікає одночасно або після виходу летких речовин, залежно від умов реакції [13]. Час, необхідний для згорання частинки коксу, може бути на кілька порядків більше, ніж час виходу летких речовин, і часто є етапом, що визначає швидкість загального згорання пилоподібного палива.

Розробка ефективних режимів використання диспергованих натуральних палив в енергетичних устроях потребує знань щодо характеристик високотемпературного тепломасообміну паливно-газових систем в залежності від параметрів процесу. Одним із таких найважливіших параметрів є температура, яка впливає, як на інтенсивність тепломасообміну, так і на кінетику реагування твердої фази з активним газом. Температура є ключовим параметром для визначення [7]: швидкості реакції горіння; розрахунку теплового потоку між частинками та навколишнім середовищем, концентрацій газоподібних компонент - продуктів реакції. Температура частинки корелює з такими досліджуваними параметрами, як зміна діаметру частинок, втрата їх маси, час згорання тощо.

Окрім того, іншими досліджуваними параметрами можуть бути [7]:

час горіння частинок як функція розміру частинок за різних температурних умов процесу; період індукції - час прогріву частинок до моменту займання [8]; в експериментах цей момент позначається появою полум'я на поверхні частинки або перевищенням її температури над температурою газу [7]; зміна діаметру та втрата маси частинок під час згорання.

Процеси тепломасообміну, запалення і горіння частинок можна вивчати за допомогою програмного моделювання фізико-хімічних і газодинамічних процесів, що відбуваються при різних способах використання пилувугільних систем [9]. Розробка фізико-математичних моделей, проведення розрахункових досліджень є оптимальним методом для розуміння процесів, які відбуваються в реальних умовах. Це дає можливість також прогнозувати поведінку паливних систем за умов, коли проведення експерименту неможливе. Аналіз літературних джерел показав, що в переважній кількості робіт, присвячених фізико-математичному моделюванню високотемпературних процесів, вивчення динаміки поведінки твердої фази в газоподібному середовищі робилося в припущенні, що частинки вугілля, потрапляючи в камеру згорання, миттєво прогріваються на всю глибину до температури її поверхні. В деяких роботах враховується фактор поступового прогрівання твердої фази [10, 11]. Але відсутні роботи щодо вивчення впливу температурного градієнта по вуглецевому масиву на характеристики горіння для широкого інтервалу температур і діаметрів частинок.

Тому метою даної роботи є вивчення впливу поширення тепла вглиб вуглецевої частинки (температурного градієнту по частинці), поміщеної в нагрітий газ, на характеристики її займання, горіння та згасання, а саме період індукції, час та температуру горіння, критичний діаметр згасання.

Проводилось фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну частинок з урахуванням та без урахування теплового потоку теплопровідністю в глибину вуглецевого масиву. Також вивчалась кінетика вигорання частинок на основі дослідження зміни її діаметра з часом. Дослідження виконувались для дрібних вуглецевих частинок (коксу) з початковими діаметрами $d_b < 1$ мм.

1. Фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну вуглецевих частинок з газом. Розглянемо задачу нестационарної теплопровідності сферичної вуглецевої частинки, вміщеної в газове окисне середовище, температура якого T_g значно вища початкової температури частинки T_b . Температура газового середовища в процесі нагрівання частинки передбачається постійною. Врахуємо хімічні перетворення в конденсованій фазі. Зміна температури поверхні частинки відбувається за рахунок конвективного і радіаційного теплообміну з окислювальним середовищем і стінками камери, за рахунок тепла екзотермічних реакцій окислення, а також за рахунок теплопровідності вглиб частинки. Необхідно визначити розподіл температури всередині частинки в довільний момент часу, а також визначити параметри її займання, горіння і згасання.

Диференціальне рівняння теплопровідності для сферичної частинки без внутрішніх джерел теплоти записується у вигляді:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де λ , ρ і C – теплопровідність, густина і питома теплоємність частинки палива відповідно (в результаті виконання задачі приймаються сталими), а r змінюється в межах $0 \leq r \leq d/2$ ($d/2 = r_s$), r_s , d – радіус і діаметр частинки.

Запишемо крайові умови для вирішення цієї задачі.

$$\text{Початкові умови: } t=0 \text{ і } 0 \leq r \leq r_s, \quad T = T_b; \quad (2)$$

Граничні умови:

$$\text{а) у центрі частинки в будь-який момент часу: } \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

$$\text{б) на поверхні частинки: } \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} = q_{ch} - q_h, \quad (4)$$

где q_{ch} – густина тепловиділення за рахунок хімічних реакцій; $q_h = q_\alpha + q_{rad}$ – загальна тепловіддача від частинки; q_α – густина теплового потоку молекулярно-конвективним шляхом і q_{rad} – густина теплового потоку випромінюванням, що визначаються згідно законів Ньютона - Ріхмана і Стефана-Больцмана, відповідно :

$$q_{\alpha} = \alpha(T - T_g), \quad \alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d}, \quad (5)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4). \quad (6)$$

В рівняннях (5) і (6): λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу; α – коефіцієнт теплообміну; Nu – критерій Нусельта; T_w – температура стінок камери; T_g – температура газу; ε – поглинальна здатність частинок палива; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴).

Теплофізичні характеристики палива відомі і є сталими в процесі нагрівання. Теплопровідність і густина газового середовища розраховувались при середньоарифметичній температурі:

$$\lambda_g = \lambda_{g0} (T_* / T_0)^{0.75}, \quad \rho_g = \rho_{g0} (T_0 / T_*), \quad T_* = (T + T_g) / 2,$$

де λ_{g0} і ρ_{g0} – коефіцієнт теплопровідності і густина газу при $T_0 = 273$ К.

Основними хімічними реакціями, що протікають на поверхні вуглецевої частинки в сухому повітрі є реакції з утворенням двоокису і оксиду вуглецю [12]:



де Q_1 , Q_2 – теплові ефекти реакцій. Для тепловиділення при протіканні хімічних реакцій на поверхні частинки маємо:

$$q_{ch} = \sum_{i=1}^2 Q_i W_{chi}, \quad (7)$$

де W_{chi} – швидкість i -ої хімічної реакції:

$$W_{chi} = \rho_g n_{O_2s} \cdot k_i, \quad k_i = k_{0i} \exp(-E_i / RT). \quad (8)$$

Тут ρ_g – густина газу; n_{O_2s} – відносна масова концентрація кисню на поверхні частинки, k_i – константа швидкості хімічної реакції; k_{0i} , E_i – передекспоненційний множник та енергія активації i -ої хімічної реакції.

Перебіг хімічних реакцій на поверхні суцільної вуглецевої частинки призводить до зміни її діаметра:

$$-\frac{1}{2} \rho \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) C_{O_2s}, \quad d(t=0) = d_b, \quad (9)$$

де M_C , M_{O_2} – молярні маси вуглецю і кисню.

Рівняння збереження енергії вуглецевої частинки у припущенні однорідності температури за її радіусом можна записати у вигляді рівняння теплового балансу:

$$\frac{1}{6} c_p d \frac{\partial T}{\partial t} = q_{ch} - q_{\alpha} - q_{rad}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (10)$$

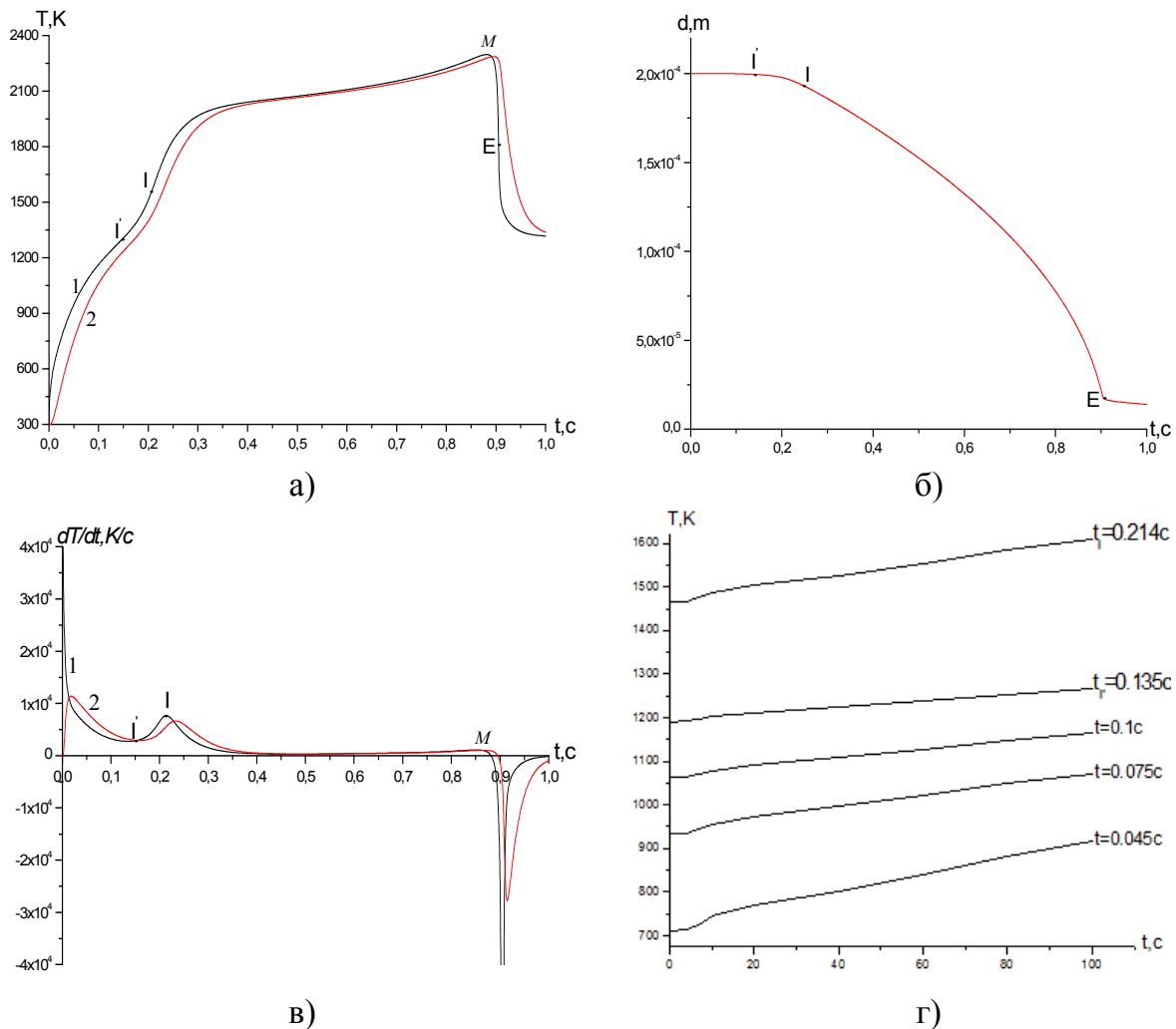


Рис. 1. Часові залежності: а) температури поверхні (1) та центра (2) частинки; б) діаметра частинки; в) похідної dT/dt на поверхні (1) і в центрі (2) частинки; г) динаміки зміни температури частинки вздовж її радіуса. $d_b=200$ мкм, $T_g=1300$ К, $T_g=T_w$.

Це припущення може бути справедливим з певною точністю для $\lambda_g \ll \lambda$, отже $Bi < 1$.

У ході комп'ютерного моделювання задачі (1) – (9) проведено аналіз впливу градієнта температури по частинці на характеристики її займання, горіння та згасання в повітрі.

2. Результати розрахунків. В результаті вирішення задачі (1) - (9) отримано: а) часові залежності температури поверхні і центру частинки; б) часові залежності діаметра частинки; в) часові похідні температури поверхні і центру частинки; г) динаміка зміни температури частинки вздовж її радіуса для фіксованих моментів часу. Вказані залежності представлено на рис.1 для суцільної вуглецевої частинки діаметром 200 мкм.

Частинка палива, потрапляючи в газоподібний окислювач, температура якого $T_g \gg T$, спочатку нагрівається як інертна, в результаті теплообміну з газом, а після активації хімічних реакцій (I) - (II) – за рахунок їх екзотермічності. Мо-

Таблиця 1.

Різниця температур поверхні і центра при займанні (т.І) і згасанні (т.Е) частинок вуглецю (для займання $\Delta T = T_s - T_c$, для згасання $\Delta T = T_c - T_s$, с-центр, s- поверхня)

d_b , мкм	ΔT , К					
	$T_g=1200\text{К}$		$T_g=1300\text{К}$		$T_g=1400\text{К}$	
	займання	згасання	займання	згасання	займання	згасання
200	94	382.3	145.1	426.7	206.4	425.2
500	93.6	388.4	174.8	413.3	272.9	363.8
800	100.2	431.5	213.4	415.5	350.2	455.4
1000	112	469.1	245.7	502.2	408.2	498.3

мент закінчення інертного прогріву і початок етапу хімічного розігріву (т.І'), момент займання поверхні частинки (т.І), а також момент її згасання (т.Е) визначалися точками екстремуму на часових залежностях швидкості зміни температури dT/dt [8].

Тривалість процесу від початку прогріву частинки до моменту її займання складає час виходу на високотемпературний режим - період індукції (t_{ind}). При досягненні діаметром і температурою частинки критичних значень (т. Е) відбувається спонтанний перехід з високотемпературного режиму теплообміну на низькотемпературний. На кривій $d(t)$ в точці Е з'являється злам, що характеризує перехід на режим повільного протікання хімічних реакцій (рис. 1,б). Час горіння частки (t_{bur}) визначається як час високотемпературної стадії, обмеженою моментами займання і згасання частинки, $t_{bur} = t_E - t_{ind}$.

Аналіз залежностей $T(t)$ для поверхні і центру вуглецевих частинок (рис. 1) показує, що на стадіях інертного і хімічного нагрівання температура центру відстає від температури поверхні, а незабаром, після виходу на високотемпературний режим, зазначені температури зближуються. При затуханні, навпаки, температура поверхні набагато нижча, ніж в центрі частинки.

На рис.1,г представлені профілі температур по радіусу частинки на стадії займання в фіксовані моменти часу. Видно, що різниця температур поверхні і центру на початку прогрівання є максимальною, потім, в момент завершення стадії інертного розігріву (т. І'), вона досягає мінімального значення. Після активації хімічних реакцій на поверхні частинки різниця температур в результаті хімічного тепловиділення знову зростає.

Із рис. 1,а випливає, що на досить протяжній ділянці стадії горіння температура центру частинки близька до температури поверхні, але в міру наближення до точки максимуму швидкості зростання температури поверхні перевищує швидкість зростання температури її центру. Це пов'язано зі зменшенням тепловтрат випромінюванням з поверхні частинки.

Отримано цікавий результат відносно температур поверхні і центру при займанні і згасанні частинок різного діаметру при різних температурах газу. В таблиц 1 надається різниця температур поверхні і центру частинок різного початкового діаметру при займанні і згасанні для різних температур нагрітого га-

зу T_g . У момент займання різниця температур поверхні і центру частинки (ΔT) тим вища, чим більше початковий діаметр частинки і вища температура газу. Якщо для частинки $d = 1$ мм різниця температур поверхні і центру в точці I для $T_g = 1200$ К становила 112 К, то при $T_g = 1400$ К вона збільшилася майже в 4 рази ($\Delta T = 408,2$ К). Причому, збільшення різниці температур поверхні і центру з ростом діаметра при високих температурах має більш виражений характер.

Наприклад, при збільшенні початкового діаметра в 5 разів (від 200 мкм до 1000 мкм) для $T_g = 1200$ К, ΔT змінилася в 1,2 рази. Для аналогічних діаметрів при $T_g = 1400$ К, ΔT збільшилася майже в 2 рази.

В момент затухання тепловтрати від частинки максимально перевершують тепловиділення хімічних реакцій, і її температура різко знижується як на поверхні, так і в центрі (рис. 1а), але температура центру перевищує температуру поверхні (табл. 1). Різниця температур центру і поверхні при затуханні значно вища, ніж при займанні: при $T_g = 1200$ К - в 4 рази, при $T_g = 1300$ К приблизно в $2 \div 3$ рази, при $T_g = 1400$ К приблизно в 1.9 разів. Слід зазначити, що при затуханні немає певної залежності різниці температур центру і поверхні від температури газу і початкового діаметра частинок (табл. 1). При цьому більш високим температурам газу відповідають більш високі значення температур поверхні і центру при затуханні і вони ж знижуються з ростом початкового діаметра частинок. В області малих діаметрів ($d_b < 200$ мкм) спостерігається зниження критичних температур поверхні і центру при згасанні, тому що ця область параметрів близька до критичних умов займання.

Порівняємо результати розрахунку характеристик займання, горіння і згасання по фізико-математичним моделям з урахуванням розподілу температури по діаметру частинки і без врахування, в припущенні, що вся частинка миттєво прогривається до температури поверхні T_s .

В таблиці 2 представлені результати розрахунку за двома згаданими моделями для часів індукції і горіння та критичного діаметра, що характеризує згасання частинки. Видно, що не врахування поширення тепла вглиб вуглецевого масиву призводить до завишених значень для характеристик високотемпературного тепломасообміну. Особливо це стосується періоду індукції. Для однорідної за температурою частинки для всього досліджуваного діапазону початкових діаметрів період індукції на 50% більше, ніж для випадку врахування розподілу температури по радіусу частинки. Для часу горіння ця похибка становить від 7% (для $d_b = 200$ мкм) до 17% (для $d_b = 1$ мм).

Збільшення часу індукції однорідних за температурою частинок пояснюється тим, що до певної температури, наприклад до T_1' , при якій активізуються хімічні реакції, прогривається весь масив вуглецевий частинки, а не прилеглі до її поверхні шари, як це відбувається у разі поступового поширення тепла вглиб частинки. Для останнього випадку спалахує поверхневий шар частинки; шари, що знаходяться ближче до її центру на момент займання, менш розігріті.

Нестационарні залежності $d(t)$ і $dT/dt(t)$ (рис.1,б,в) дозволяють визначити критичний діаметр d_E , що характеризує згасання частинки, при заданій

Таблиця 2

Порівняння характеристик займання, горіння та згасання вуглецевої частинки з (1) та без (2) врахування розподілу температури по її радіусу ($T_g = 1300$ К).

d_b , мкм	t_{ind} , с		t_{bur} , с		d_{E_2} мкм	
	1	2	1	2	1	2
200	0.21	0.34	0.69	0.74	18	22.8
500	0.68	1.05	4.58	5.12	18	22.8
800	1.17	1.73	12.23	14.18	18	22.8
1000	1.47	2.13	19.43	22.8	18	22.8

температурі газу. При цьому температура газу і стінок установки і температура частинки в момент затухання також являються критичними. Критичний діаметр затухання є важливою характеристикою процесу горіння, тому що він визначає фізичний недогар вуглецевого палива.

З табл.2 випливає, що з урахуванням розподілу тепла вглиб вуглецевого масиву спостерігається зниження критичного діаметра, що характеризує згасання частинки (d_E), при даній температурі газу приблизно на 5 мкм.

На рис. 2 надаються залежності максимальної температури поверхні частинки T_{max} та відповідної їй температури центра T_c від початкового діаметра частинки. Видно, що максимальна температура, до якої нагрівається поверхня при горінні, практично не залежить від початкового діаметра частинки, а визначається тільки температурою газу. При високих температурах газу та великих діаметрах частинок відставання температури в центрі від температури її поверхні становить близько 300 К.

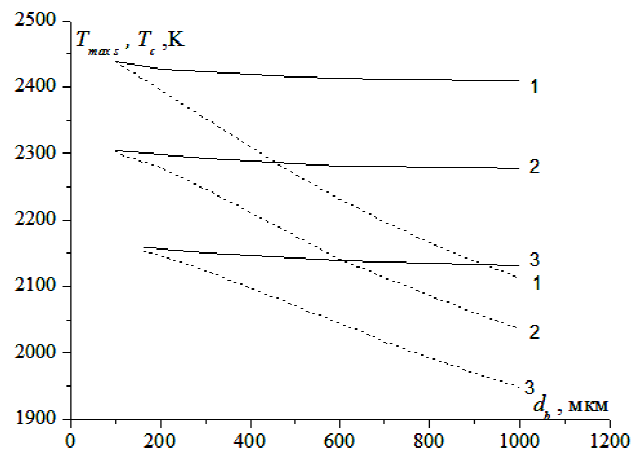


Рис. 2. Залежність максимальної температури поверхні частинки (суцільна лінія) і, відповідній їй, температури в центрі частинки (пунктир) від початкового діаметра. 1 – $T_g = 1400$ К, 2 – $T_g = 1300$ К, 3 – $T_g = 1200$ К.

Температура горіння частинки, розрахована за точною моделлю (з урахуванням температурного градієнту), в середньому на 100 градусів нижча для всього діапазону початкових діаметрів d_b . Врахування розподілу температури по частинці призводить до зниження максимальної температури горіння, що є цілком зрозумілим, оскільки тепловий потік, зумовлений теплопровідністю частинки, відводить енергію з її поверхні.

Висновки. Вивчено вплив неоднорідності поля температур по вуглецевій частинці на характеристики високотемпературного тепломасообміну при тем-

пературах газу $T_g = 1200 \div 1400 \text{K}$ і початкових діаметрах частинок $d_b = 0,2 \div 1 \text{mm}$.

Показано, що в момент займання температура центру частинки нижча за температуру її поверхні (від 100 до 400 градусів), і ця різниця тим більша, чим більший початковий діаметр частинки і вища температура газу. При згасанні різниця температур центру та поверхні більша, ніж при займанні і становить для досліджених температур газу та діаметрів частинок 400- 500 градусів.

Встановлено, що неврахування поширення тепла вглиб вуглецевого масиву призводить до підвищених значень для характеристик високотемпературного тепломасообміну в інтервалі температур газу $T_g = 1200 \div 1400 \text{K}$: для періоду індукції - на 50%, для часу горіння - 7% \div 17%, температури горіння - на 100K, для діаметру, що характеризує згасання, приблизно на 5мкм. Таким чином, неврахування градієнту температур вздовж радіуса частинки призводить до спотворення результатів математичного моделювання задачі високотемпературного тепломасообміну, особливо на стадії займання.

Доведено, що при визначенні характеристик високотемпературного тепломасообміну вуглецевих частинок з початковими діаметрами $d_b > 200 \text{mkm}$ необхідно враховувати розподіл температури по радіусу частинки.

Література

1. *Alan Williams*. Combustion and Gasification of Coal. – CRC Press, 2000.– 272p.
2. *Tom Robl, Anne Oberlink, Rod Jones* Coal combustion products (CCP's) : characteristics, utilization and beneficiation. – Cambridge, MA; Kidlington, 2017. – 564 p.
3. *L. Douglas Smoot* Fundamentals of Coal Combustion: For Clean and Efficient Use (Coal science and technology). – Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1993. – 751 p.
4. *Juan Riaza, Reza Khatami, Yiannis A. Leventis, Lucía Álvarez, María V. Gil, Covadonga Pevida, Fernando Rubiera, José J. Pis* Single particle ignition and combustion of anthracite, semi- anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions // Combustion and Flame. – 2014. – Vol. 161, №4. – P. 1096-1108.
5. *H. Lee, S. Choi* An observation of combustion behavior of a single coal particle entrained into hot gas flow // Combustion and Flame. – 2015, 162 (6). – P. 2610-2620.
6. *Juwei Zhang*. Coal Combustion Research Advances (Energy Science, Engineering Technology). – Nova Novinka; UK ed. Edition, 2011. – 60 p.
7. *E.Marek, K.Stańczyk* Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // J Sustain Mining. – 2013, 12 (3). – P.17-31.
8. *S.G. Orlovska* The influence of the collective effect on the characteristics of high-temperature heat and mass transfer of aggregates of porous carbon particles // Physics and Chemistry of Solid State. – 2011, – Vol.12, №2. – P. 490-499.

9. *Marcio L. de Souza-Santos* Solid Fuels Combustion and Gasification Modeling, Simulation, and Equipment Operations.- Second Edition, CRC Press. – 2010. – 508 p.
10. *Changsheng Bu, Daoyin Liu, Xiaoping Chen, David Pallarès, Alberto Gómez-Barea* Ignition behavior of single coal particle in a fluidized bed under O₂/CO₂ and O₂/N₂ atmosphere: a combination of visual image and particle temperature // Applied Energy. – 2014. – Vol. 115. – P. 301-308.
11. *K.A.Avdeev, F.S.Frolov, A.A. Borisov, S.M. Frolov* Modified model of magnesium particle ignition // Chemical Physics. – 2008. – Vol.27, № 6. – P.45-31.

Orlovska S.G.

The influence of temperature distribution over a carbon particle on its ignition and combustion characteristics

SUMMARY

The work conducted a study on the influence of heat flow by thermal conductivity into the depth of a carbon particle on the characteristics of its ignition, combustion, and extinction in air heated to a high temperature.

Physical and mathematical modeling of the processes of high-temperature heat and mass transfer and the kinetics of parallel chemical reactions on the surface of carbon particles was carried out, which made it possible to determine the induction period, time and temperature of particle combustion, critical diameters at which their extinction occurs. An analysis of the influence of the temperature gradient along the particle radius, caused by non-simultaneous heating of the layers of the carbon mass, on these characteristics was carried out. The studies were carried out for carbon particles with initial diameters of 0.2 ÷ 1 mm for the gas temperature range of 1200÷1400K, which are usually implemented in combustion devices.

As a result of studying the dynamics of particle heating, it was found that significant temperature gradients are observed along the particle radius, both at the moment of ignition and at the moment of its extinction. During extinction, the temperature gradients are much higher. For the studied intervals of gas temperatures and particle diameters during extinction, the difference in temperatures of the center and surface of the particles is on average 400÷500K. At the moment of ignition of particles, the temperature of their center is lower than the surface temperature by 100÷400K, and this difference is greater, the larger the initial diameter of the particle and the higher the gas temperature. It is proved that failure to take into account the uneven heating of particles into the depth of the carbon mass leads to inaccuracy in determining the main characteristics of ignition and combustion for the studied interval of particle diameters: for the induction period - by 50%, for the burning time from 7% to 17%, the burning temperature - by 100K, for the diameter characterizing extinction, by approximately 5 microns. It is proven that it is necessary to take into account the temperature gradient, especially at the stage of particle ignition.

Keywords: *heat and mass transfer, ignition, combustion, extinction, carbon particles, temperature gradient, induction period, burning time.*