

С.Г. Орловська

Експериментальні дослідження та фізико-математичне моделювання впливу неоднорідності температурного поля по вуглецевій частинці на характеристики її займання, горіння і згасання

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна, svetor25@gmail.com

Робота присвячена експериментальним дослідженням та фізико-математичному моделюванню високотемпературного теплообміну та хімічного перетворення вуглецевих частинок з урахуванням внутрішньої теплопровідності. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування характеристик займання, горіння та згасання твердих палив в теплотехнічних процесах. У більшості теоретичних підходів використовується ізотермічне наближення частинки, що може привести до похибок у визначенні періоду індукції і часу вигорання, особливо для частинок субміліметрового та міліметрового діапазону.

Запропонована неізотермічна модель, що включає внутрішню теплопровідність в частинці, реакції окиснення, теплообмін конвекцією і випромінюванням. Проведено чисельні розрахунки для інтервалу діаметрів 100-1000 мкм з аналізом температурних полів та градієнтів на стадіях займання і згасання. Показано, що зі зростанням діаметра частинки збільшується температурний перепад між поверхнею і центром, тоді як радіальний температурний градієнт зменшується внаслідок просторового розтягнення температурного поля та зростання нестационарного теплового часу. Експериментальні дослідження з міліметровими частинками показали значні температурні градієнти на стадії займання і ідентифікували момент займання максимальним значенням часової похідної поверхневої температури частинки.

Порівняння розрахунків з використанням ізотермічної та неізотермічної моделей засвідчило систематичне підвищення часу займання і горіння частинки без врахування внутрішньої теплопровідності. Показано, що в області малих розмірів частинок неврахування внутрішньої теплопровідності призводить до відсутності займання. Отримані результати підтверджують необхідність неізотермічного опису для коректного прогнозування характеристик горіння вуглецевих частинок з розмірами більше 200 мкм.

Ключові слова: вуглецеві частинки, займання, горіння, згасання, температурний градієнт, внутрішня теплопровідність, період індукції, час горіння.

Подано до редакції 26.09.2025; прийнято до друку 03.03.2026; опубліковано 30.03.2026.

Вступ

Процеси займання та горіння дисперсних вуглецевих частинок у високотемпературному газовому середовищі відіграють ключову роль у задачах енергетики, пилувугільного спалювання, газифікації твердого палива та низці високотемпературних технологічних процесів [1-4]. При цьому характеристики займання, горіння та

згасання цих частинок визначають не лише ефективність енергетичних процесів, але й питання технічної безпеки, екологічної продуктивності та експлуатаційної надійності обладнання [5-7]. У практиці використання вугілля в енергетиці все частіше спостерігається необхідність точного прогнозу часових характеристик займання (періоду індукції) та вигорання частинок різних розмірів і структури. Це пов'язано з тим, що перехід від

квазіізотермічної поведінки дрібних частинок до вираженого теплового градієнту в крупних частинках суттєво впливає на процес горіння і може призводити до помилкових оцінок ключових характеристик, якщо такий градієнт ігнорувати.

Характеристики займання і горіння вугільних частинок сильно залежать від властивостей вуглецевого масиву і газу, розміру частинок та умов їх взаємодії з окиснювачем. Зокрема, аналіз високотемпературного тепломасообміну для поодиноких вуглецевих частинок і в газових суспензіях показав, що вплив початкового діаметра частинок і температури навколишнього газу на період індукції, час горіння та критичні параметри займання і згасання є визначальним для опису поведінки таких систем [8-11]. В експериментальних дослідженнях займання вугільних частинок та їх сумішей із біомасою [12] встановлено значний вплив розміру частинок на затримку займання та стабільність подальшого горіння, що підтверджує важливість врахування реальних термічних режимів та фізичних властивостей палива і окиснювача.

У значній кількості теоретичних робіт опис теплового стану частинки базується на ізотермічному наближенні, у межах якого температура твердої фази вважається однорідною в об'ємі. Такий підхід істотно спрощує математичну модель і в ряді випадків дає задовільні результати для малих частинок або слабких теплових ефектів. Однак він не враховує скінченну швидкість теплопровідного прогріву твердої фази та можливе формування температурного градієнта всередині частинки. Особливо це може бути актуальним для міліметрових розмірів частинок.

Аналіз теплофізичних масштабів показує, що внутрішній тепловий стан частинки в нестационарному процесі визначається передусім характерним часом теплопровідного вирівнювання температури, який квадратично зростає зі збільшенням її розміру. Навіть за малих значень числа Біо це може приводити до істотного відставання температури центральних областей від температури поверхні під час індукційного прогріву, а отже - до виникнення внутрішньої неізотермічності.

В деяких теоретичних роботах, присвячених фізико-математичному моделюванню високотемпературних режимів в дисперсних вуглецевих системах враховується неізотермічність твердої фази [13-16], що дозволяє більш точно інтерпретувати отримані результати. В [14] встановлено, що з підвищенням температури газу вплив неізотермічності на характеристики горіння зростає. В експериментальній роботі [8] також звертається увага на роль внутрішньої неізотермічності для великих розмірів частинок.

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених неізотермічному прогріву частинок, узгоджене фізичне пояснення ролі внутрішньої теплопровідності на різних стадіях процесу, від займання до повного вигорання, залишається недостатньо сформульованим. Метою даної роботи є встановлення закономірностей формування внутрішньої неізотермічності вуглецевих частинок у високотемпературному газовому середовищі та

визначення її впливу на індукційний період займання, тривалість вигорання і умови згасання з урахуванням нестационарної теплопровідності твердої фази. Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати характерні теплофізичні часові масштаби процесу; дослідити вплив розміру частинки на перепад температур між її поверхнею та центром; встановити області застосованості ізотермічного та неізотермічного опису.

I. Експериментальні дослідження

Із проведеного літературного огляду випливає, що багато експериментальних досліджень присвячено саме визначенню температури частинки під час займання і згорання, тому що температура є ключовим елементом для визначення швидкості горіння, теплових потоків за рахунок конвекції і випромінювання. Окрім того, температура корелює з такими досліджуваними параметрами, як діаметр частинок, втрата маси, час згорання. Саме в такому напрямі проводились експериментальні дослідження в даній роботі. Досліди проводились з вуглецевими частинками діаметрами 4-8 мм, які мали сферичну форму та були виготовлені механічним шляхом із вугільного матеріалу. Експериментальні дослідження займання і горіння частинок проводилися на установці, блок-схема якої представлена на рис.1.

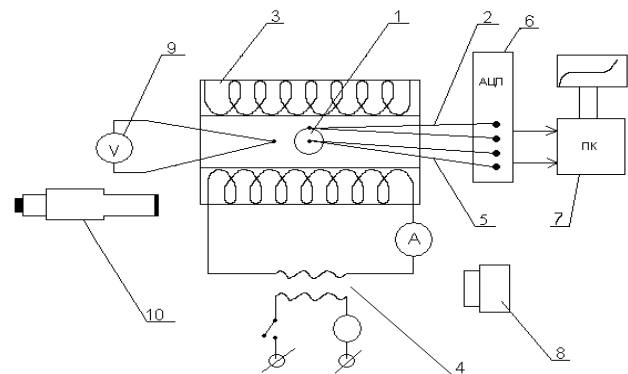


Рис.1. Блок-схема експериментальної установки:
1 – частинка вуглецю; 2, 5, 9 – термопари;
3 – високотемпературна піч; 4 – автотрансформатор;
6 – аналого-цифровий перетворювач;
7 – персональний комп'ютер; 8 – цифрова камера;
10 – яскравісний пірометр.

Частинка вуглецю (1) вносилися в нагріту до високої температури піч (3) на термопарі (5). Температура поверхні частинки контролювалася хромель-алюмелевою термопарою (2), яка щільно притискалася до поверхні. Нагрівання печі здійснювався подачею напруги за допомогою автотрансформатора (4). Температура нагрітого повітря в печі контролювалася хромель-алюмелевою термопарою (9). Зміна температури на поверхні і в центрі частинки реєструвалася аналого-цифровим перетворювачем (6), сигнали від якого подавалися на персональний комп'ютер (7), де проводилася обробка даних і розрахунок часових похідних температури

частинки (dT/dt). Крім того, температура частинок вуглецю в процесі високотемпературного окислення вимірювалася за допомогою яскравісного пірметра (10). Одночасно велася відеозйомка частинки за допомогою цифрової камери (8) з метою спостереження за процесом окислення та визначення діаметра частинки в режимі реального часу.

На рис.2 надаються зображення високотемпературного окислення частинки вуглецю діаметром $d_b=5.1$ мм в печі при температурі 1140 К. Внаслідок зменшення розміру частинки при вигоранні, згодом, відбувається її падіння на кварцеву підкладку. На підкладці при тій же температурі газу відбувалося її подальше окислення, що фіксувалося в режимі реального часу на цифрову камеру, аж до моменту згасання.

Результат обробки експерименту надається на рис. 3. у вигляді часових залежностей температури в центрі і на поверхні частинки, похідних температур за часом dT/dt та діаметру частинки. На рис.3а і 3в окремо виділена початкова стадія прогріву та займання.

На отриманих часових залежностях температур

поверхні і центру частинок, а також швидкостей їх зміни чітко простежуються наступні стадії високотемпературного окислення частинки: 1) інертне нагрівання – ділянка кривих до точки I', на якій похідна dT/dt зменшується і проходить через мінімум; 2) стадія хімічного нагрівання – ділянка I' - I, на якій частинка прогривається за рахунок тепла самоприскорених екзотермічних хімічних реакцій. В кінці цієї стадії частинка займається (т.І), похідна dT/dt - максимальна; 3) стадія квазістаціонарного високотемпературного окислення – ділянка на кривих після точки I.

Видно, що на стадії інертного прогріву температура поверхні частинки перевищує температуру її центру. Поведінка кривих dT/dt є подібною з запізненням відносно центру приблизно на 10 секунд. Через 20 секунд після займання температури поверхні і центру зрівнюються, і надалі на всьому етапі високотемпературного окислення, термопара в центрі частинки фіксує більше значення температури, ніж на термопара на поверхні.

Однією з причин заниження температури є більші тепловтрати конвективним і променевим шляхом з

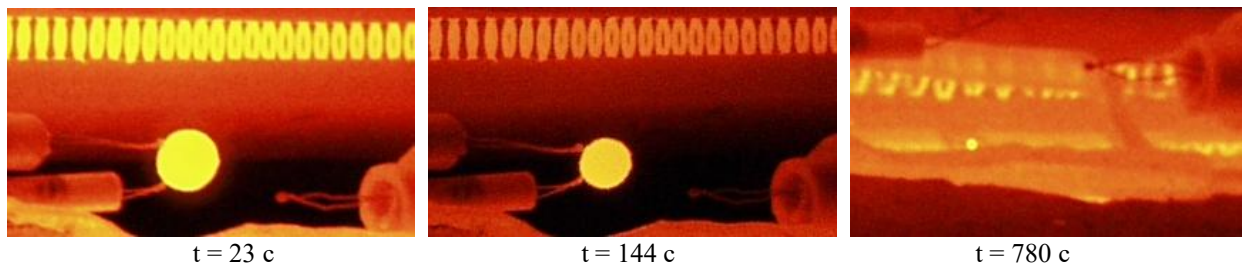


Рис.2. Зображення частинки, що окислюється в нагрітій печі на термопарі та згодом на підкладці при температурі 1140 К.

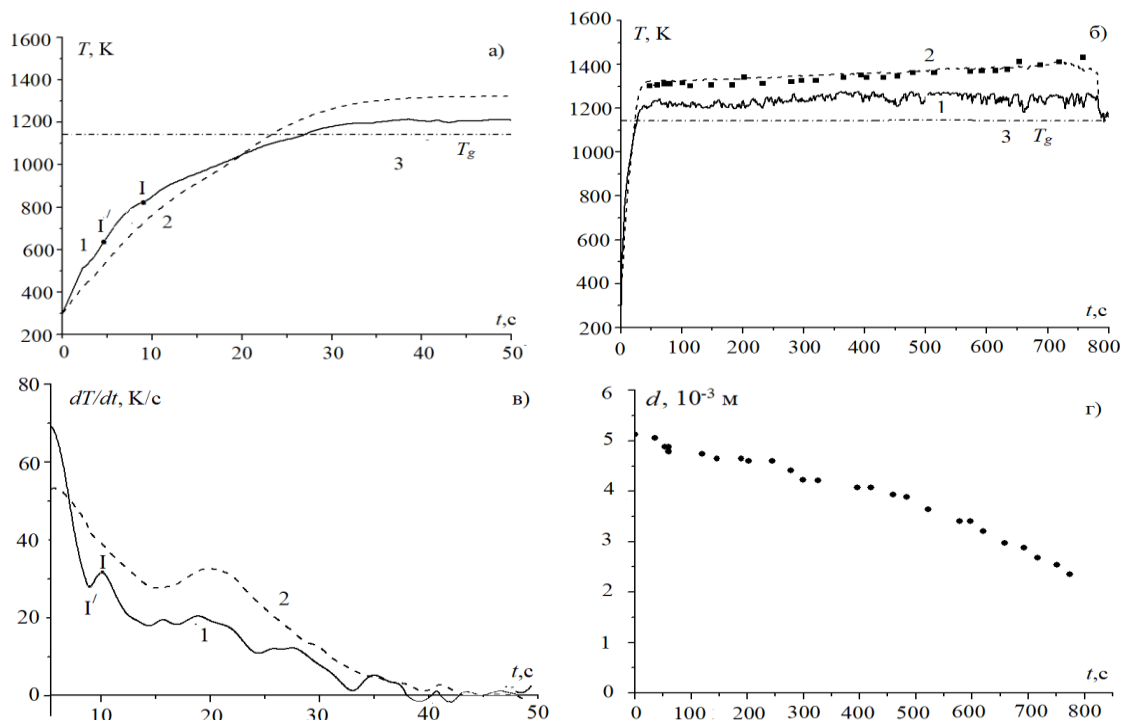


Рис. 3. Експериментальні часові залежності: а) і в) температур і похідних на стадії займання: (1) – виміри на поверхні частинки, (2)- виміри в її центрі; б) і г) під час всього експерименту: б) (1) - температура поверхні T_s , (2) - центру T_c , (3) - повітря в печі T_g , ■ - температура, виміряна яскравісним пірметром; г) плинний діаметр частинки. $d_b=5.1$ мм, $T_g=1140$ К.

поверхні зовнішньої термопари. Окрім того, згодом після займання, внаслідок зменшення діаметру частинки при вигоранні, відбувається порушення контакту між термопарою і частинкою. По кінограмам процесу окислення відстежувався момент втрати щільного контакту між зовнішньою термопарою і частинкою. Тому достовірними можуть бути значення температури поверхні в період прогріву і займання та на початковій стадії високотемпературного режиму. Надалі ця термопара фіксувала температуру газу поблизу поверхні частинки. Коливання на часових залежностях температури поверхні і її похідної (dT/dt) на високотемпературній стадії (рис. 3, б, в) виникають в результаті конвективних теплових потоків від частинки. Температура частинки, виміряна яскравісним пірометром в процесі окиснення, добре збігається з температурою, що вимірюється внутрішньою термопарою.

Після переходу до високотемпературного стану діаметр частинки починає інтенсивно зменшуватися (рис. 3, г), але його виміри перериваються при значенні 2.5 мм в результаті падіння частинки з термопари на кварцеву підкладку. Обробка часової залежності плинного діаметру частинки в координатах $d^2=f(t)$ показала дифузійний режим горіння для всіх досліджуваних діаметрів вуглецевого палива.

Отже по результатам експерименту можна константувати наступне: 1) перехід до високотемпературного окиснення частинки (горіння) відбувається коли часова похідна її температури набуває максимального значення, що відображає максимальне перевищення тепловиділення від хімічних реакцій окиснення над тепловтратами конвективно - молекулярним та променевим шляхом; 2) при займанні температура поверхні частинки випереджує температуру її центру, тобто період індукції розрахований відносно поверхні і центру частинки має різні значення; 3) високотемпературне окиснення вуглецевих частинок відбувається в дифузійному режимі.

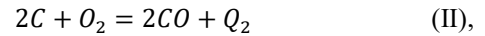
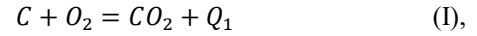
II. Фізико-математичне моделювання

Проведемо фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну і хімічного перетворення частинок вуглецевого палива з урахуванням температурного градієнту по вуглецевому масиву. Розглянемо задачу нестационарної теплопровідності сферичної вуглецевої частинки, вміщеній в газове окисне середовище, температура якого T_g значно вища початкової температури частинки T_b . Для поодинокі частинки можна вважати, що температура газового середовища (повітря) в процесі її нагрівання і окиснення залишається сталою. Частинка починає нагріватися завдяки молекулярно-конвективному теплообміну її поверхні:

$$q_\alpha = \alpha(T - T_g), \quad \alpha = \frac{\lambda_g \text{Nu}}{d}, \quad (1)$$

де q_α – густина теплового потоку молекулярно-конвективним шляхом; λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу; α – коефіцієнт теплообміну; Nu – критерій Нусельта; T_w – температура стінок камери; T_g – температура газу.

При підвищенні температури на поверхні частинки починаються хімічні реакції окислення. Основними хімічними реакціями, що протікають на поверхні вуглецевої частинки в сухому повітрі є реакції з утворенням двоокису і оксиду вуглецю [17]:



де Q_1, Q_2 – теплові ефекти реакцій. Ці реакції є екзотермічними. Сумарне хімічне тепловиділення можна розрахувати з використанням законів діючих мас та Ареніуса:

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

$$W_{chi} = C_{O_{2s}} \cdot k_i, \quad k_i = k_{0i} \exp(-E/RT). \quad (2)$$

В цих рівняннях: q_{ch} – густина тепловиділення за рахунок хімічних реакцій; W_{chi} – швидкість i -ої хімічної реакції; ρ_g – густина газу; $C_{O_{2s}}$ – концентрація кисню на поверхні частинки, k_i – константа швидкості хімічної реакції; k_{0i}, E_i – передекспоненційний множник та енергія активації i -ої реакції.

Концентрація кисню на поверхні частинки визначається як кінетикою хімічних реакцій, так і дифузиею кисню до поверхні частинки:

$$C_{O_{2s}} = C_{O_{2\infty}} \left(\frac{\sum_{i=1}^2 k_i}{\beta} + 1 \right)^{-1}, \quad (3)$$

де $\beta = DSh/d$ – коефіцієнт масообміну, D – коефіцієнт дифузії, Sh – критерій Шервуда, $C_{O_{2\infty}}$ – відносна концентрація кисню в повітрі.

Теплообмін випромінюванням між поверхнею частинки і стінками реакційної установки задається законом Стефана-Больцмана:

$$q_w = \varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4), \quad (4)$$

де q_w – густина теплового потоку випромінюванням; T_w – температура стінок камери; ε – коефіцієнт поглинальної здатності палива; σ – стала Стефана-Больцмана.

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

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5)$$

де λ, ρ і C – теплопровідність, густина і питома теплосмність частинки палива відповідно, а r змінюється в межах $0 \leq r \leq r_s, r_s = d/2, r_s, d$ – радіус і діаметр частинки.

Запишемо початкові і граничні умови для вирішення цієї задачі.

Початкові умови:

$$t = 0 \text{ і } 0 \leq r \leq r_s, \quad T = T_b \quad (6)$$

Граничні умови в центрі частинки:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (7)$$

і на поверхні частинки:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} = q_{ch} - q_{\alpha} - q_w \quad (8)$$

В результаті високотемпературного окиснення діаметр вуглецевої частинки зменшується згідно рівняння масового балансу:

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

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

У випадку відсутності градієнта температури по частинці, за умови $\lambda_g \ll \lambda$ (отже $Bi < 1$), рівняння теплового балансу для частинки можна записати у вигляді:

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

Задача (1) - (9) вирішувалась чисельно методом кінцевих різниць. У ході комп'ютерного моделювання проведено аналіз впливу градієнта температури

вздовж радіуса частинки на характеристики її займання, горіння та згасання в нагрітому повітрі. З метою визначення розмірів частинок, для яких врахування температурного градієнту є необхідним, моделювання проводилося для широкого діапазону діаметрів: 100÷1000 мкм.

На рисунку 4 надаються результати розрахунку для вуглецевої частинки, діаметром $d = 500$ мкм, яка окислюється в повітрі, нагрітому до температури $T_g = 1300$ К. Простежується аналогія між розрахунковими та експериментальними часовими залежностями температур поверхні і центру частинки та відповідних похідних dT/dt . Екстремуми на похідній температури поверхні частинки dT/dt фіксують моменти її займання (т. I) і згасання (т. E). Період індукції (t_{ind}) складається з тривалості двох послідовних стадій: інертного (до т. I') та хімічного (до т. I) розігріву. На першій стадії температура частинки збільшується за рахунок молекулярно-конвективного теплообміну з газом, на другій – за рахунок тепла екзотермічних реакцій окиснення. На стадії займання спостерігаються великі градієнти температури, як на початку нагрівання, так і в момент займання частинки (рис.4 г), що впливає на точність визначення періоду індукції.

Час горіння визначається тривалістю високотемпературного окиснення від моменту займання до моменту згасання частинки $t_{bur} = t_E - t_{ind}$. В кінці високотемпературної стадії відбувається різке збільшення температури частинки. Аналіз теплових потоків показав, що це пов'язано зі зменшенням тепловіддачі випромінюванням від

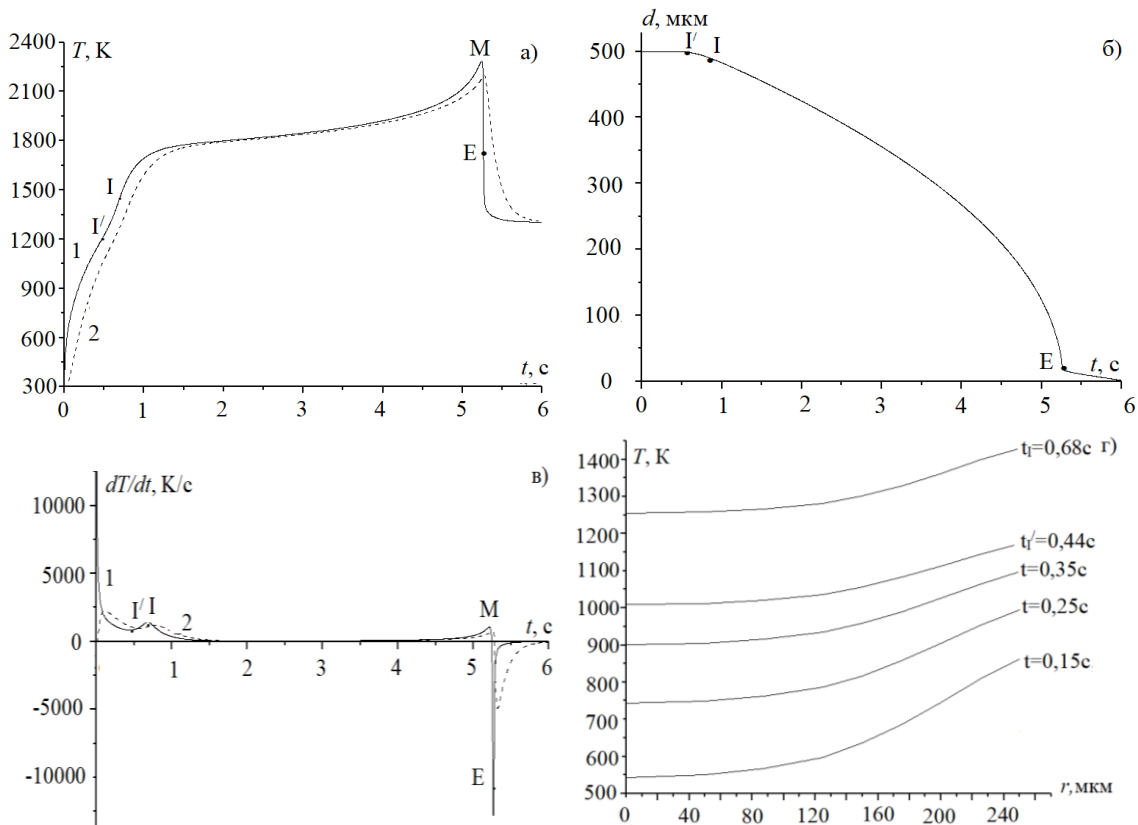


Рис. 4. Часові залежності: а) температури на поверхні частинки (1) та в центрі (2), б) діаметра частинки, в) похідної dT/dt на поверхні (1) і в центрі (2) частинки; г) різниця температур вздовж радіуса частинки. $d_b=500$ мкм ($r_s=250$ мкм), $T_g=1300$ К, $T_g=T_w$.

частинки при зменшенні її діаметру, а отже площі випромінювання. Але зростають при цьому тепловтрати молекулярно-конвективним шляхом (згідно формули (1)). Температура поверхні досягає максимального значення (т.М) і починає зменшуватися.

Розрахунок показав, що на високотемпературній стадії окиснення температури поверхні і центра практично однакові (рис.4а), тобто градієнти температури по радіусу частинки відсутні. Окиснення на цій стадії протікає в дифузійному режимі, отже лімітується швидкістю дифузії кисню до поверхні частинки. Інтенсивна зміна діаметра на цій стадії підкоряється закону $d^2 = K_{bur}t = \text{const}$, що підтверджується експериментальними даними.

При досягненні діаметром і температурою частинки критичних значень (т. Е) відбувається мимовільний 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. Якщо при займанні температура центру відстає від температури поверхні частинки, то при згасанні, навпаки, температура поверхні набагато нижча, ніж в центрі частинки (рис.4а).

Для аналізу результатів розрахунку введемо поняття середнього радіального градієнту температури, який дорівнює відношенню різниці температур поверхні і центра частинки до її радіуса $\langle dT/dr \rangle = (T_s - T_c)/r_s$. Така оцінка має сенс, якщо режим нагрівання або охолодження є нестационарним (у нашому випадку саме так). Нестационарність процесу обумовлена екзотермічними хімічними реакціями, які протікають на поверхні вуглецевої частинки.

В таблиці 1 надаються дані розрахунку різниць температур та радіальних температурних градієнтів при займанні та згасанні вуглецевих частинок різних діаметрів.

Внутрішній температурний перепад між поверхнею і центром частинки $\Delta T = T_s - T_c$ безпосередньо відображає баланс між тепловиділенням в поверхневій реакції та теплопереносом усередині твердої фази, що робить його інформативним параметром для аналізу критичних режимів займання і згасання.

Із наведених даних видно, що при займанні зі зростанням діаметру, різниця температур між

поверхнею і центром збільшується, але середній радіальний температурний градієнт зменшується. Збільшення ΔT обумовлено зростанням характерного лінійного розміру системи (радіусу частинки), а саме: збільшується характерна довжина теплопереносу, що приводить до зростання внутрішнього теплового опору і, відповідно, до формування більшого температурного перепаду.

Оцінимо час вирівнювання температури вздовж радіуса частинки. Характерна часова шкала внутрішнього теплового вирівнювання визначається переносом тепла від поверхні і впливає з розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності. Для сферичної частинки вона масштабується як $\tau \sim r_s^2/a$, де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу (вуглецевої частинки) [18]. Результати розрахунку відображено в таблиці 2. Із зростанням радіуса частинки час вирівнювання температури зростає як r_s^2 , тому внутрішня область довше залишається холодною і перепад температур між поверхнею і центром збільшується (табл. 1)

Із таблиці 1 видно, що незважаючи на те, що різниця температур зі зростанням діаметра збільшується, середній радіальний градієнт $\Delta T/r_s$ зменшується. Оцінимо швидкість зростання ΔT зі збільшенням r_s виходячи із даних табл.1.

Нехай $\Delta T \propto r_s^n$, тоді $\left(\frac{\Delta T}{r_s}\right) \propto r_s^{n-1}$. Якщо $n < 1$ – градієнт спадає, $n = 1$ – сталий, $n > 1$ – зростає. Оцінка n , при використанні даних табл.1 дає значення $n = 0.33$. Тоді для середнього радіального градієнту маємо: $\frac{\Delta T}{r_s} \propto r_s^{-0.67}$, тобто середній радіальний градієнт зменшується при збільшенні радіуса частинки навіть попри зростання самої різниці температур як $\Delta T \propto r_s^{0.33}$.

Експериментально знайдений показник степені $n = 0.33$ відображає режим протікання хімічної реакції в момент займання. У чисто кінетичному режимі швидкість реакції визначається тільки температурною залежністю за законом Ареніуса, а концентрація кисню на поверхні стала і дорівнює $C_{O_2,s} \approx C_{O_2,\infty}$. Тоді густина хімічного тепловиділення (2) не залежить від розміру частинки і визначається тільки температурою поверхні:

$$q_{ch} = \left(\sum_{i=1}^2 k_i Q_i\right) C_{O_2,\infty}$$

Завдяки теплопровідності це тепло розповсюджується в глибину вуглецевого масиву. Тоді залежність перепаду температур від радіуса ΔT є лінійною, тобто

Таблиця 1.

Різниця температур поверхні і центра ΔT , а також середні радіальні градієнти при займанні (т.І) і згасанні (т.Е) частинок вуглецю. ($\Delta T = T_s - T_c$, s- поверхня с-центр), $d_E = 18$ мкм – критичний діаметр, при якому частинка згасає за даної температури $T_E = 1300$ К.

$d_b = 2r_s$, мкм		200	500	800	1000
Займання	ΔT , К	145.1	174.8	213.4	245.7
	$\Delta T/r_s$, К/м	$1.45 \cdot 10^6$	$6.9 \cdot 10^5$	$5.3 \cdot 10^5$	$4.9 \cdot 10^5$
Згасання	ΔT , К	-426.7	-413.3	-415.5	-502.2
	$\Delta T/r_E$, К/м	$-4.74 \cdot 10^7$	$-4.59 \cdot 10^7$	$-4.62 \cdot 10^7$	$-5.58 \cdot 10^7$

Таблиця 2.

Характерний час вирівнювання температури τ за рахунок теплопровідності $r_s = d_b/2$.

r_s , мкм	50	100	250	400	500
$\tau = r_s^2/a$, с	0.003	0.01	0.07	0.18	0.28

$n = 1$:

$$\Delta T = T_s - T_c = q_{ch} r_s / \lambda. \quad (11)$$

В дифузійній області протікання реакції її швидкість обмежується швидкістю підводу окиснювача до поверхні частинки. Тоді з (2) і (3) випливає:

$$q_{ch} = \frac{\sum_{i=1}^2 k_i Q_i}{\sum_{i=1}^2 k_i} C_{O_2\infty} \beta \quad (12)$$

Так як коефіцієнт масообміну обернено пропорційний радіусу, то $q_{ch} \propto \frac{1}{r_s}$.

Враховуючи це в температурному перепаді (11), маємо: $\Delta T \propto (1/r_s) \cdot r_s = 1$ або $\Delta T \propto r_s^0$, тоді $n = 0$ – для чисто дифузійної області.

Таким чином, виходячи з експериментальних даних для займання, ми отримали, що $0 < n \approx 0.33 < 1$, тобто при займанні хімічна реакція протікає в перехідній області, що підтверджується результатами розрахунків [10].

Проведемо аналіз результатів табл. 1 щодо згасання. Спостерігаються набагато більші значення різниць температур і середніх радіальних температурних градієнтів, ніж при займанні: різниці температур ΔT і градієнти $\Delta T/r_s$ вищі більш, ніж у 2 рази, а середній радіальний градієнт $\Delta T/r_E$, розрахований відносно радіуса згасання, більший в 30÷100 разів. Якщо займання частинки відбувається при діаметрах, близьких до початкового d_b , то згасання – при досягненні діаметром критичного значення d_E (рис. 2, б). Але $d_E \ll d_b$, тому радіальні градієнти в момент згасання достатньо великі. Температура центру набагато вища, ніж температура поверхні. Поверхня швидко охолоджується внаслідок молекулярно - конвективного теплообміну з газом (q_a) при досягненні діаметром частинки критичного значення d_E . Тепловтрати випромінюванням (q_w) значно менші, в зв'язку зі зменшенням поверхні частинки. При згасанні не відстежується певної залежності різниці температур і середнього радіального градієнту від початкового діаметру частинки. Це відбувається тому, що критичний діаметр згасання d_E не залежить від початкового розміру частинки і визначається характеристиками газу (температурою газу, концентрацією окислювача). Тому різниці температур і радіальні температурні градієнти для всіх початкових діаметрів при згасанні відрізняються незначно.

Порівнюємо характеристики займання, горіння і

згасання з урахуванням температурного градієнту по частинці (неізотермічна модель, рівняння (1)-(9)) і без врахування (ізотермічна модель, рівняння (9) - (10)), тобто в припущенні миттєвого прогрівання вуглецевого масиву до температури поверхні T_s . Результати такого аналізу надаються в таблиці 3.

Видно, що не врахування внутрішньої теплопровідності в глибину вуглецевого масиву (ізотермічна модель) призводить до завищених значень характеристик займання, горіння і згасання. 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 менша і зростає зі збільшенням розміру частинки (від 7% для $d_b = 200$ мкм до 17% для $d_b = 1$ мм). Окрім того, ізотермічний підхід дещо змінює критичні умови займання: частинка діаметром $d_b = 100$ мкм при $T_g = 1300$ К не займається, в той час як неізотермічна модель показує стійке займання і горіння (табл. 3).

Таким чином, урахування радіальної неізотермічності частинки призводить до накопичення тепла в приповерхневій області та зменшення ефективного нагрітого об'єму частинки в порівнянні з її повним об'ємом. Це зумовлює скорочення часу займання (t_{ind}) в порівнянні з ізотермічною моделлю. Тобто локалізація тепла на поверхні прискорює займання.

При горінні спостерігається менший вплив неізотермічності, так як температури поверхні і центра майже однакові (рис.4 а). Горіння відбувається в дифузійному режимі і швидкість реакції (відповідно тепловиділення) задається коефіцієнтом масообміну (формула (12)), який є обернено пропорційний радіусу частинки. Тому внутрішній радіальний градієнт слабше впливає на час вигорання (t_{bur}) і різниця між моделями значно менша. Максимальна температура горіння частинки у випадку неврахування неоднорідності температури по вуглецевому масиву майже на 100 градусів більша для всіх досліджуваних діаметрів.

Ізотермічний підхід також призводить до збільшення критичного діаметру згасання (табл.3), тому що при згасанні існують значні радіальні градієнти: центр частинки максимально перегрітий відносно поверхні. Значення максимальних температур, так як і критичних діаметрів згасання, не залежать від початкового діаметра частинки і визначаються параметрами повітряного середовища. Таким чином, неврахування радіального

Таблиця 3.

Характеристики займання, горіння та згасання вуглецевої частинки з урахуванням ($dT/dr \neq 0$) і без врахування ($dT/dr=0$) температурного градієнту вздовж радіуса частинки при температурі газу $T_g = 1300$ К.

Характеристики		t_{ind}, c		t_{bur}, c		d_E, mkm		$T_{max,s}, K$	
dT/dr		$\neq 0$	$= 0$	$\neq 0$	$= 0$	$\neq 0$	$= 0$	$\neq 0$	$= 0$
$d_b,$ мкм	100	0.1	-	0.17	-	18	-	2304	-
	200	0.21	0.34	0.69	0.74	18	22.8	2298	2393
	500	0.68	1.05	4.58	5.12	18	22.8	2289	2393
	800	1.17	1.73	12.23	14.18	18	22.8	2280	2393
	1000	1.47	2.13	19.43	22.8	18	22.8	2278	2393

температурного градієнту по частинці призводить до помилкових оцінок ключових характеристик займання, горіння і згасання вуглецевого палива.

Висновки

Проведене фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну та хімічного перетворення вуглецевих частинок з урахуванням внутрішньої теплопровідності показало що під час займання і згасання частинок з початковими діаметрами $d_b=100\div 1000$ мкм формується перепад температур між поверхнею та центром частинки ΔT і відповідний радіальний температурний градієнт $\Delta T/r_s$, що свідчить про неізотермічний характер теплового стану твердої фази.

Встановлено, що зі зростанням початкового діаметра частинки різниця температур між поверхнею та центром збільшується через уповільнення внутрішнього теплового вирівнювання, характерний час якого масштабується як відношення квадрата радіуса частинки до коефіцієнта температуропровідності ($\tau \sim r_s^2/a$). Водночас цей перепад реалізується на більшій просторовій відстані, тому радіальний температурний градієнт зменшується. Отже, одночасне зростання ΔT і спадання градієнта $\Delta T/r_s$ є прямим наслідком нестационарної теплопровідності в частинках більшого розміру.

Експериментальні дослідження, виконані з міліметровими частинками, підтвердили значне відставання температури центра від температури поверхні в момент займання, тобто існування температурного перепаду та радіального градієнту. Окрім того, експериментальним шляхом було підтверджено, що в момент займання часова похідна температури частинки набуває максимального

значення, що є критерієм для визначення періоду індукції вуглецевих частинок. Також підтверджено дифузійний режим горіння частинок $d^2(t) = K_{bur} = \text{const}$.

Розрахунками встановлено, що при згасанні різниця температур і радіальні градієнти значно вищі, ніж при займанні, не залежать від початкового діаметру частинок і визначаються критичним діаметром згасання. Збільшення різниці температур обумовлена різким сповільненням хімічної реакції на поверхні при зростаючих тепловтратах молекулярно-конвективним шляхом. Внаслідок кінцевої внутрішньої теплопровідності температура центру значно перевищує температуру поверхні. Таким чином неврахування теплової інерції об'єму частинки призводить до некоректного визначення часу горіння.

Показано, що використання ізотермічної моделі для інтервалу діаметрів $100\div 1000$ мкм призводить до завищених значень щодо періоду індукції, часу і температури горіння, критичного діаметру згасання. Для часу займання (періоду індукції) похибка складає до 50%, часу горіння – від 7 до 17%, критичного діаметру згасання - 26%. В області малих діаметрів (100 мкм) для ізотермічної частинки не виконуються критичні умови займання. Таким чином, ізотермічна модель систематично недооцінює характерні часові масштаби процесу.

Отримані результати обґрунтовують необхідність неізотермічного опису навіть для частинок субміліметрового діапазону. Врахування радіальної теплопровідності, внутрішнього температурного градієнта в частинці є необхідним для коректного прогнозування високотемпературних процесів і їх характеристик.

Орловська С.Г. – кандидат фізико-математичних наук, доцент факультету математики, фізики та інформаційних технологій.

- [1] H. Yan, B. Nie, F. Kong, Y. Liu, *Experimental investigation of coal particle size on the kinetic properties of coal oxidation and spontaneous combustion limit parameters*, Energy, 270, 126890 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126890>.
- [2] K. Lei, B. Ye, J. Cao, R. Zhang, *Combustion characteristics of single particles from bituminous coal and pine sawdust in O₂/N₂, O₂/CO₂, and O₂/H₂O atmospheres*, Energies, 10(11), 1695 (2017); <https://doi.org/10.3390/en10111695>.
- [3] E. Marek, K. Stańczyk, *Case studies investigating single coal particle ignition and combustion*, J Sustain Mining, 12 (3), 17 (2013); <http://dx.medra.org/10.7424/jsm130303>.
- [4] A. Williams, *Combustion and Gasification of Coal*, CRC Press, 272 (2000); ISBN 9781560325499.
- [5] J. Riaz, R. Khatami, Y. A. Levendis, L. Ález, M. V. Gil, C. Pevida, F. Rubiera, J. J. Pis, *Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals*, Combustion and Flame, 161(4), 1096 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.10.004>.
- [6] J. Riaz, J. Gibbins, H. Chalmers, *Ignition and combustion of single particles of coal and biomass*, Fuel, 202, 650 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.011>.
- [7] X. Shi, Yu. Zhang, X. Chen, Yu. Zhang, *Effects of thermal boundary conditions on spontaneous combustion of coal under temperature-programmed conditions*, Fuel, 295, 120591, (2021); <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120591>.
- [8] R. Khatami, C. Stivers, K. Joshi, Y.A. Levendis, A.F. Sarofim, *Combustion behavior of single particles from three different coal ranks and from sugar cane bagasse in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres*, Combustion and Flame, 159(3), 1253 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.009>.
- [9] Ch. Bu, D. Liu, X. Chen, D. Pallarès, A. 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, 115, 301 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.040>.

- [10] 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, 12(2), 490 (2011); http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2011_12_2_38.
- [11] S.G. Orlovska, O.M. Zui, *Study of high-temperature heat-mass transfer of two-fraction gas suspensions and individual carbon particles in heated air*, Physics and chemistry of solid state, 25(2), 338 (2024); <https://doi.org/10.15330/pcss.25.2.338-345>.
- [12] D. Glushkov, A. Zhuikov, N. Zemlyansky et al., *Influence of the Composition and Particle Sizes of the Fuel Mixture of Coal and Biomass on the Ignition and Combustion Characteristics*, Appl. Sci., 13(19), 11060 (2023); <https://doi.org/10.3390/app131911060>.
- [13] S.R. Gubba, L. Ma, M. Pourkashanian, A. Williams, *Influence of particle shape and internal thermal gradients of biomass particles on pulverised coal/biomass co-fired flames*, Fuel Processing Technology, 92(11), 2185 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.07.003>.
- [14] S.G. Orlovska, *The influence of temperature distribution over a carbon particle on its ignition and combustion characteristics*, Physics of Aerodisperse Systems, 62, (2024); <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2024.62.318555>.
- [15] S. Sazhin, J. Yang, M. Heikal, *On the kinetics of ignition of carbonaceous particles with internal temperature gradients*, Fuel, 85(10-11), 1411 (2006); <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.010>.
- [16] V. Shigapov, V. Gromov, *Ignition of a single fuel particle with allowance for internal temperature gradient*, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 51(1), 1 (2015), <https://doi.org/10.1007/s10573-015-0544-1>.
- [17] D.M. Khzmalyan, *Theory of furnace processes* (Energoatomizdat, 1990) ISBN 5-283-00063-X.
- [18] M. N. Özisik, *Heat Conduction*, 2nd Ed. (New York, NY: Wiley, 1993).

S.G. Orlovska

Experimental studies and physical and mathematical modeling of the influence of the inhomogeneity of the temperature field along a carbon particle on the characteristics of its ignition, burning and extinction

Odessa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, svetor25@gmail.com

This work is devoted to experimental studies and physico-mathematical modeling of high-temperature heat and mass transfer and chemical transformation of carbon particles, accounting for internal thermal conductivity. The relevance of the study is driven by the need to improve the accuracy of predicting the ignition, combustion, and extinction characteristics of solid fuels in thermotechnical processes. Most theoretical approaches utilize an isothermal particle approximation, which can lead to errors in determining the induction period and burnout time, particularly for particles in the submillimeter and millimeter range.

A non-isothermal model is proposed, incorporating internal thermal conductivity within the particle, oxidation reactions, and heat exchange via convection and radiation. Numerical calculations were performed for a diameter range of 100–1000 μm , with an analysis of temperature fields and gradients during the ignition and extinction stages. It is shown that as the particle diameter increases, the temperature differential between the surface and the center grows, while the radial temperature gradient decreases due to the spatial expansion of the temperature field and the increase in transient thermal time. Experimental studies with millimeter-sized particles revealed significant temperature gradients at the ignition stage and identified the moment of ignition by the maximum value of the time derivative of the particle's surface temperature.

A comparison of calculations using isothermal and non-isothermal models demonstrated a systematic overestimation of ignition and burning time when internal thermal conductivity is neglected. It is shown that in the range of small particle sizes, failing to account for internal thermal conductivity leads to a predicted absence of ignition. The results obtained confirm the necessity of a non-isothermal description for the correct prediction of combustion characteristics for carbon particles larger than 200 μm .

Keywords: carbon particles, ignition, combustion, extinction, temperature gradient, internal thermal conductivity, induction period, burning time.