

УДК 536.46

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

С.Г. Орловська, О.М. Зуй

Вивчення високотемпературного тепломасообміну двофракційних газозависів і поодиноких вуглецевих частинок в нагрітому повітрі

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

В роботі проведено дослідження закономірностей високотемпературного тепломасообміну в двофракційних газозависах вуглецевих частинок в нагрітому повітрі. Ці дослідження актуальні для прогнозування високотемпературних процесів в камерах згорання та визначення основних характеристик цих процесів: періоду індукції, часу та температури горіння, критичних параметрів займання і згасання. Фізико-математичне моделювання задачі проведено на основі рівнянь тепломасообміну та хімічної кінетики для компонент газозавису з урахуванням молекулярно-конвективного і променевого механізмів переносу тепла. Вивчено характеристики займання, горіння та згасання двофракційного газозавису вуглецевих частинок з рівними масовими концентраціями дрібною (60 мкм) і великою (120 мкм) фракцій в інтервалі температур 1100 ÷ 1500 К; проведено порівняння з характеристиками для поодиноких частинок відповідних діаметрів. Доказано, що при зниженні температури газу період індукції дрібною фракцією може перевищувати період індукції великою фракцією, при цьому температура горіння дрібних частинок стає нижчою за температуру горіння великих частинок. При високих температурах газу (1400К, 1500К) ситуація змінюється на протилежну. Знайдено критичні параметри займання і згасання двофракційних газозависів (температури газу, діаметри частинок).

Ключові слова: тепломасообмін, займання, горіння, згасання, газозавис, вуглецеві частинки.

Подано до редакції 17.02.2024; прийнято до друку 13.05.2024.

Вступ

Вугілля продовжить залишатися одним з основних енергетичних ресурсів протягом наступних кількох десятиліть через його низьку ціну і багаті запаси [1, 2]. Продукти спалювання та газифікації вугілля (оксиди вуглецю, азоту, сірки та тверді залишки) призводять до забруднення навколишнього середовища та є джерелом антропогенних викидів парникових газів [1, 3]. Тому виникає необхідність в розробці нових чистих технологій використання та переробки вугільної сировини [4]. На сьогодні розглядаються два напрямки зменшення викидів CO₂: спалювання пиловидного вугілля в різних газових середовищах, як то O₂/H₂O, O₂/C₂O, O₂/N₂, з різною концентрацією кисню, та з використанням частинок біомаси. В багатьох експериментальних та

теоретичних роботах поєднуються ці два напрямки [5-10].

Горіння вугільного палива є складним процесом, який включає послідовні, частіше послідовно-паралельні стадії: вихід летких речовин, спалахування та горіння летких речовин [8, 11, 12], 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 пило-

подібного палива. Фізична структура вугілля, включаючи структуру пор, площу поверхні, розмір частинок та вміст неорганічних речовин є важливими параметрами для розуміння та моделювання процесів високотемпературного окислення вугілля. Хімічні властивості вугілля впливають на реакційну здатність вуглецевого палива, критичні параметри займання, і являються важливими факторами для прогнозування і запобігання самозайманню палива в місцях його видобутку та зберігання [14-17]. На основі досліджень [16] було запропоновано метод визначення кінетичних параметрів окислення вугілля, які можна застосувати для чисельного моделювання. Крім того, визначено стадії, на яких різні фактори, а саме температура або концентрація кисню, є домінуючими в процесі високотемпературного окислення.

Розробка ефективних режимів використання диспергованих натуральних палив в енергетичних устроях потребує знань щодо характеристик високотемпературного тепломасообміну паливно-газових систем в залежності від параметрів технологічного 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 елементом для визначення [18]: швидкості реакції горіння; розрахунку теплового потоку до частинки або від неї за рахунок конвекції і випромінювання; концентрацій газоподібних компонент - продуктів реакції. Температура палаючої частинки корелює з такими досліджуваними параметрами, як зміна діаметру частинки, втрата їх маси, час згоряння тощо.

Окрім того, іншими досліджуваними параметрами можуть бути [18]:

- час горіння частинок як функція розміру частинок за різних температурних умов процесу;
- час займання частинок (період індукції), визначається часом від початку нагрівання частинки до моменту самоприскорення реакції окислення на її поверхні [19]; в експериментах - цей момент позначається появою полум'я на поверхні частинки або перевищенням її температури над температурою газу [18];
- час окремих стадій згоряння частинок - час згоряння летких речовин, час згоряння вуглецевого залишку (коксу);
- зміна розміру та втрата маси частинок під час згоряння.

Втрата маси частинок в процесі горіння обумовлена як зменшенням їх зовнішнього діаметру, так і зменшенням густини, внаслідок вигорання вуглецю в порах. Вуглецевий масив пронизаний порами, які можуть мати різні розміри [20] в залежності від сорту вугілля і кількості летких речовин. В основному це мікропори, які мають достатньо добру фрактальну структуру [21] і хімічні реакції при окисленні та горінні частинки можуть протікати в її порах. Вугілля з розвинутою внутрішньою поверхнею пор має більш сильну тенденцію до спалахування і горіння [20-22].

Тверде паливо спалюється в пилоподібному стані в пиловугільних котлах або в подрібненому стані в

вихрових топках та топках з киплячим шаром [1, 4, 23]. На протязі останніх десятиліть основним є пилоподібний метод спалювання, коли в топку пиловугільне паливо подається повітрям, що використовується для спалювання.

Складні процеси, що відбуваються в енергетичних устроях можна вивчати також за допомогою програмного моделювання фізико-хімічних, газодинамічних процесів та технологічних особливостей різних способів використання пиловугільних систем [24]. 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. На сьогодні активно розроблюються фізико-математичні моделі горіння сумішей частинок вугільного пилу з повітрям та пропано - повітряними сумішами в різних реакційних об'ємах при різних масових концентраціях пилу та концентраціях окислювача [14, 15, 25-27]. Аналіз експериментальних і теоретичних робіт показав, що в них відсутні дослідження явища фізичного недопалу, яке полягає в мимовільному згасанні палаючих частинок при досягненні ними критичних розмірів. Явище мимовільного згасання пов'язане зі зміною теплового балансу частинок в наслідок конкуренції процесів хімічного тепловиділення і теплового потоку від частинок при зменшенні їх діаметра внаслідок згорання [19]. Зменшення недопалу частинок є однією із важливих задач підвищення ефективності та чистоти згорання вугільного палива. Дослідження [22] показали, що використання вуглецевого палива з розвинутою структурою пор призводить до збільшення повноти згорання.

Пиловугільне паливо, що вдювається в реакційний об'єм енергетичних устроїв, згорає у вигляді газозависів. Воно є полідисперсним, тобто містить частинки різного розміру. Окремим випадком полідисперсного палива є двофракційний газозавис, який містить в своєму складі переважно частинки двох розмірів (милку та крупну фракції) в різних масових співвідношеннях. В загальній реакційній суміші частинки неоднакових розмірів реагують з різною інтенсивністю при різних температурах поверхні і концентрації окислювача біля неї [11, 23]. Особливості протікання високотемпературних процесів в двофракційних вуглецевих системах при різних температурах вивчено недостатньо. Метою роботи є дослідження закономірностей високотемпературного тепломасообміну (займання, горіння та згасання) двофракційних газозависів вуглецевих частинок у повітрі при різних температурах нагрітого газу та порівняння з перебігом цих процесів для поодинокі частинки, поміщеної в нагріте до такої ж температури повітряне середовище. Вивчення поведінки поодинокі частинки в нагрітому газі є необхідним для оцінки впливу колективного ефекту. В газозависах кисень витрачається на велику кількість частинок і через це механізм горіння може бути іншим [18].

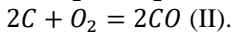
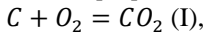
Для визначення характеристик займання, горіння

і згасання газозависів і поодиноких вуглецевих частинок було проведено фізико-математичне моделювання задачі та чисельний експеримент за різних температурних умов та масових концентрацій палива.

I. Теоретична частина

В основу фізико-математичної моделі високотемпературного тепломасообміну та кінетики хімічних перетворень двофракційного газозавису частинок покладено диференційні рівняння теплового та масового балансів для частинок кожної з фракцій та відповідні рівняння для газової суміші, яка містить окислювач [19, 28].

При попаданні вуглецевого палива в нагрітий окислювач на поверхні та в порах частинок починають протікати хімічні реакції, внаслідок чого частинки займаються і горять. Для температур газу в інтервалі 1100 ÷ 1500 К можна скористатися схемою перебігу двох паралельних хімічних реакцій між вуглецем та киснем [23]:



Вираз для сумарної густини хімічного тепловиділення для частинки i -тої фракції в результаті поверхневого та внутрішнього реагування в порах запишемо у вигляді [28]:

$$q_{ch} = (k_{li}q_l + k_{2i}q_2)\rho_g n_{O_2,si} (1 + K_i), K_i = \frac{k_{vi}}{k_{li} + k_{2i}}, \text{ (1)}$$

де q_{ch} – сумарна густина хімічного тепловиділення на поверхні та в порах частинки, k_{li}, k_{2i} – константи швидкостей хімічних реакцій (I) і (II), – теплові ефекти хімічних реакцій (I) і (II), ρ_g – густина газу, $n_{O_2,si}$ – відносна масова концентрація кисню на поверхні вуглецевої частинки; k_{vi} – ефективна константа внутрішнього реагування [19, 22].

У камері згоряння відбувається молекулярно – конвективний ($q_{\alpha i}$) та променистий (q_{wi}) теплообмін частинок з нагрітим газом та зі стінками реакційного об'єму. Густини цих теплових потоків знайдемо відповідно з рівнянь:

$$q_{\alpha i} = q_{\lambda i} + q_{sfi}, q_{\lambda i} = \alpha_i(T_i - T_g), \alpha_i = \frac{Nu\lambda_g}{d_i}, \text{ (2)}$$

$$q_{wi} = \varepsilon\sigma(T_i^4 - T_w^4), \text{ (3)}$$

де $q_{\lambda i}$ – складова густини теплового потоку, обумовлена молекулярно-конвективним теплообміном, q_{sfi} – складова густини теплового потоку, обумовлена стефанівською течією [22], α_i – коефіцієнт теплообміну частинки з газом, T_i, T_g, T_w – відповідно: температури частинки, газу та стінок реакційної камери, λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу, d_i – діаметр частинки.

Запишемо рівняння теплового та масового балансу для частинки i -тої фракції:

$$\frac{c\rho_i d_i}{6} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{chi} - q_{\alpha i} - q_{wi}, T_i(t=0) = T_{ib}, \text{ (4)}$$

$$-\frac{1}{2}\rho_i \frac{\partial(d_i)}{\partial t} = W_s, W_s = \frac{M_c}{M_{O_1}}(k_{li} + 2k_{2i})n_{O_1,s}\rho_g, \\ d_i(t=0) = d_b \text{ (5)}$$

$$-\frac{1}{6}d_i \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = W_{s_i}K_i, \rho_i(t=0) = \rho_{bi} \text{ (6)}$$

Тут c – питома теплоємність частинки, ρ_i – її густина, t – час, M_c, M_{O_2} – молярні маси вуглецю і кисню відповідно.

При горінні пиловугільного газозавису в реакційному об'ємі змінюються з часом температура газу та концентрація кисню. Рівняння теплового та масового балансів для газу з урахуванням зовнішнього тепло- та масообміну мають вигляд:

$$c_g\rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \sum_{i=1}^n S_i C_{N_i} q_{\alpha i} + \alpha_g F_g (T_g - T_{g\infty}), T_g(t=0) = T_{g\infty}, \text{ (7)}$$

$$-\frac{\partial n_{O_2,g}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n C_{N_i} S_i n_{O_2,si} (k_{li} + k_{2i} + k_{vi}) - F_g \beta_g (n_{O_2,\infty} - n_{O_2,g}), n_{O_2,\infty}(t=0) = n_{O_2,\infty}, \text{ (8)}$$

де c_g – питома теплоємність газу, S_i – площа поверхні частинки, F_g – питома поверхня газозавису, $n_{O_2,g}$ – відносна масова концентрація кисню в газі, α_g, β_g – коефіцієнти теплообміну та масообміну газозавису з навколишнім середовищем, C_{N_i} – чисельна концентрація частинок i -тої фракції, яка пов'язана з масовою концентрацією вуглецевого палива співвідношенням:

$$C_{m_i} = \frac{1}{6}\pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_i \cdot C_{N_i}, C_m = \sum_{i=1}^n C_{m_i}$$

Розрахунки представлених рівнянь дозволяють визначити основні характеристики горіння газозависів: час затримки займання або період

індукції, час і температуру горіння, критичні параметри займання та згасання (температури газу, діаметри частинок, концентрації палива та окислювача). Для розрахунків вибрано двофракційний газозавис ($i=2$) з діаметрами частинок дрібної фракції 60 мкм, великої фракції – 120 мкм та рівними масовими концентраціями фракцій. Дослідження проводилися для температур газу в реакційній камері від 1100 К до 1500 К.

II. Результати фізико-математичного моделювання та їх аналіз

Проведемо дослідження впливу температури

нагрітого газу на характеристики займання двофракційних газозависів і поодиноких частинок тих же початкових діаметрів. На рисунку 1а, б надаються залежності періоду індукції t_{ind} двофракційного газозавису і поодинокі частинки від початкової температури газу. З рис. 1а випливає, що для температур газу $T_{g\infty} > 1400$ К період індукції дрібної фракції менше, ніж великої. Потім, зі зниженням температури газу, відбувається зближення періодів індукції дрібної та великої фракцій, і при температурах повітря $T_{g\infty} < 1400$ К частинки великої фракції займаються раніше, ніж дрібної. Зростання періоду індукції дрібної фракції порівняно з крупною фракцією для температур $T_{g\infty} < 1400$ К пояснюється збільшенням коефіцієнта тепловіддачі до газу зі зменшенням діаметра частинок (формули 2). Відомо, що займання частинки складається з двох стадій [19]: стадії інертного (теплого) розігріву до температури, близької до температури газу, і стадії хімічного розігріву, на якій відбувається самоприскорення хімічних реакцій на поверхні частинки. Отже, період індукції є сумою часів інертного та хімічного розігріву: $t_{ind} = t_h + t_{ch}$.

З таблиці 1 випливає, що для дрібної фракції при зменшенні температури газу час хімічної стадії періоду індукції зростає набагато більше, ніж для великої фракції. При зниженні температури газу з $T_{g\infty} = 1500$ К до $T_{g\infty} = 1300$ К час хімічного розігріву дрібних частинок збільшився майже 27 разів.

Порівняно з часом інертного розігріву (t_h), час хімічного розігріву (t_{ch}) дрібних частинок зріс більше ніж у 7 разів. Інакше виглядає ситуація для великої фракції газозавису з діаметрами частинок 120 мкм. Для цих частинок незалежно від температури газу тривалість хімічної стадії періоду індукції менша за тривалість стадії інертного прогріву приблизно в 4 рази. Таким чином, в області високих температур період індукції двофракційного газозавису частинок визначається періодом індукції дрібних частинок, а в області низьких температур – періодом індукції частинок великої фракції.

Таблиця 1.

Характерні часи розігріву частинок на стадії займання двофракційного газозавису за різних початкових температур газу.

$T_{g\infty}$, К	1500		1300	
d_b , мкм	60	120	60	120
t_h , мс	15,6	34,1	42,8	127,4
t_{ch} , мс	12,2	23,2	335,9	99,7

При певній критичній температурі газу T_{cr} (рис. 1, а, б) частинки не займаються (період індукції плине до нескінченності).

Ця температура газу називається температурою займання. З рис. 1а і 1б випливає, що критична температура займання двофракційного газозавису

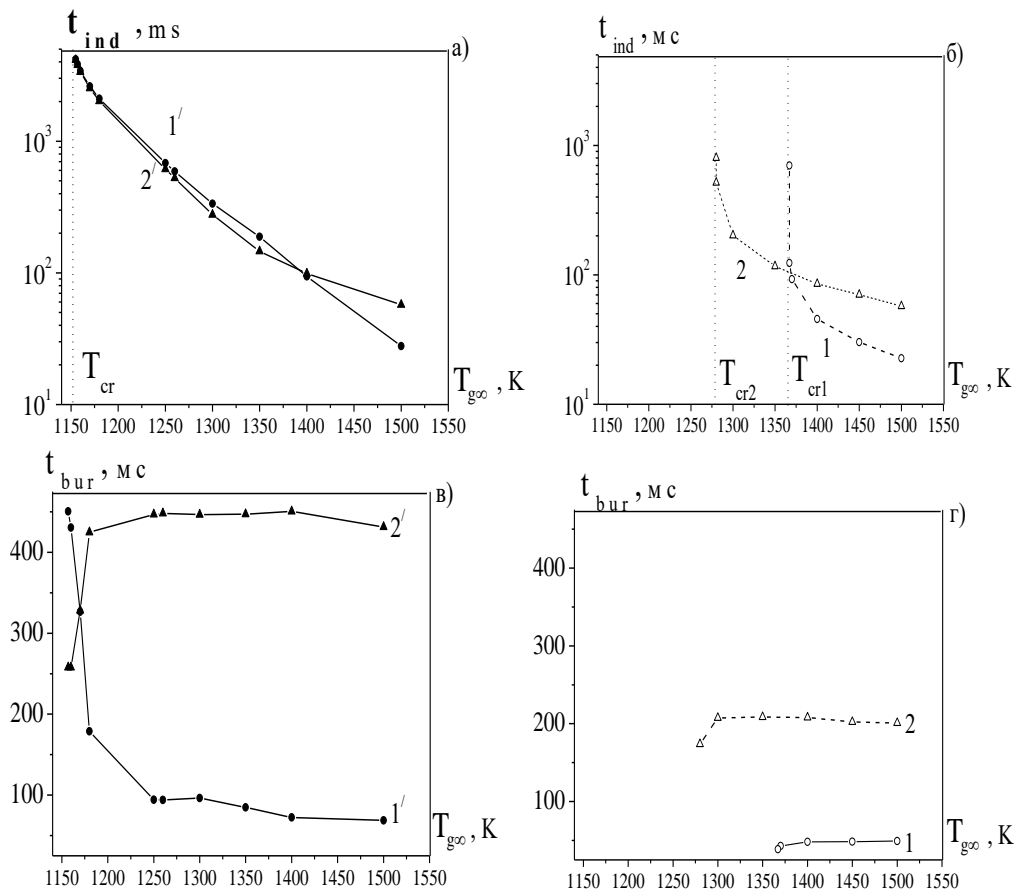


Рис.1. Залежності періоду індукції (t_{ind}) і часу горіння (t_{bur}) від початкової температури газу ($T_{g\infty}$) для: а, в) – двофракційного газозавису (криві 1' – ••••• - $d_{b1} = 60$ мкм, 2' – ▲▲▲▲▲ - $d_{b2} = 120$ мкм, $C_{mb} = 0.0244$ кг/м³) і б), г) – поодинокі частинки (криві 1 – ○○○○○ - $d_b = 60$ мкм, 2 – ▲▲▲▲▲ - $d_b = 120$ мкм). d_b – початковий діаметр частинки, C_{mb} – початкова масова концентрація палива.

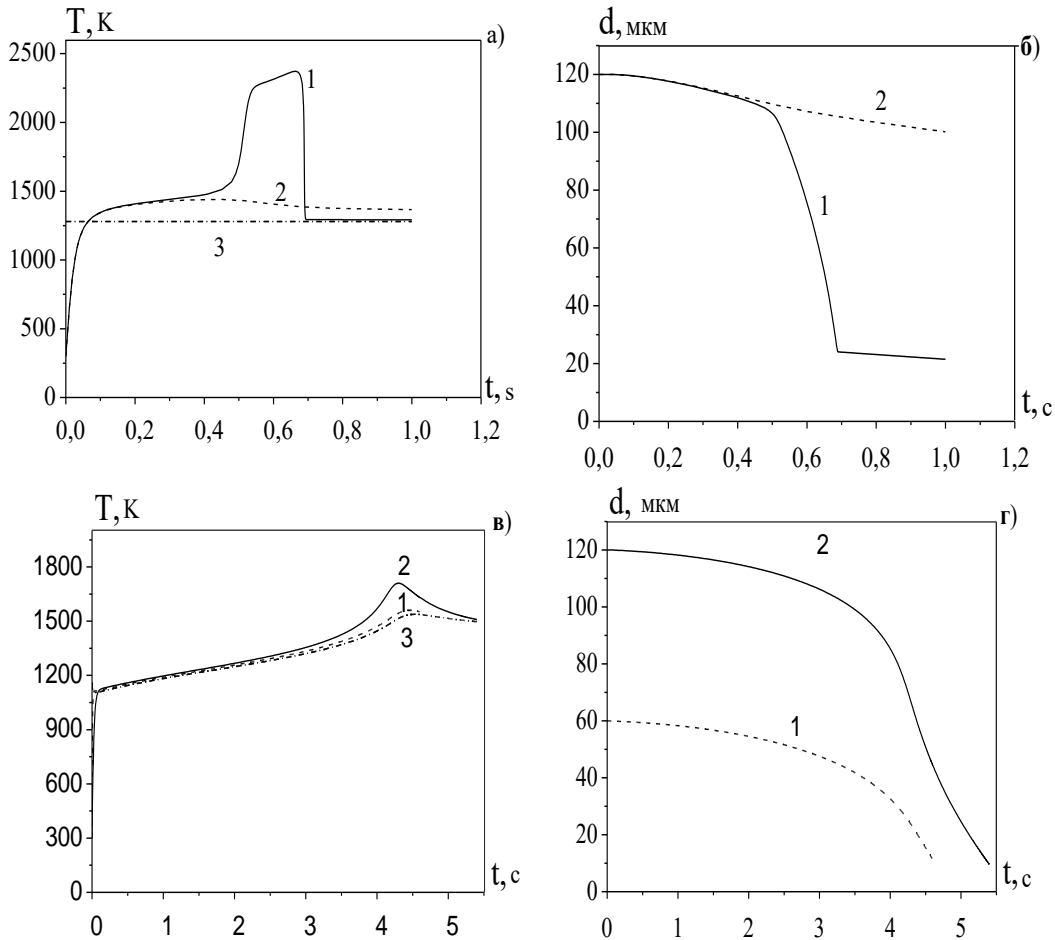


Рис 2. Часові залежності температури та діаметра частинок поблизу критичних умов займання: а, б) поодинокі частинки $d_b = 120 \mu m$, 1 – $T_{g\infty} = 1280 K$; 2 – $T_{g\infty} = 1279 K$; 3 – рівень $T_{g\infty}$ в,г) двофракційний газозавис: 1 – $d_{b1} = 60 \mu m$, 2 – $d_{b2} = 120 \mu m$, 3 – рівень T_g ; $T_{g\infty} = 1155 K$.

значно нижче температури займання поодиноких частинок того ж діаметру. Причому, критичні температури займання для поодиноких великих (T_{cr2}) і дрібних (T_{cr1}) частинок суттєво різняться (рис. 1,б), а в умовах двофракційного газозавису практично збігаються (рис.1,а).

На рисунку 1 в, г представлено час горіння двофракційного газозавису і поодиноких частинок в залежності від початкових температур нагрітого газу. Видно, що час горіння дрібної та великої фракції в газовій суміші слабо залежать від температури газу. Час горіння великої фракції майже в 4,5 рази перевищує час горіння дрібної фракції, при відношенні їх початкових діаметрів рівному 2, що підтверджує дифузійний режим горіння цих частинок. Час горіння частинок газозавису обох фракцій приблизно в 2 рази більше часу горіння поодиноких частинок відповідних діаметрів, що обумовлено суттєвим зменшенням коефіцієнта надлишку кисню в об'ємі газозавису.

Слід зазначити, що поблизу критичної температури газу T_{cr} час затримки займання поодинокі частинки набагато менше, ніж час затримки займання частинок ідентичних розмірів в умовах газозавису (рис. 2).

З рисунка 2 а,б випливає, що для поодинокі частинки критичні умови займання виражені чітко. А

саме, при зменшенні температури газу всього на один градус частинка не запалюється, а прогривається до температури, що дещо перевищує температуру газу (крива 2, рис.2а). Критичні умови згасання для поодинокі частинки, що горить, також чітко виражені, а саме: при досягненні діаметром частинки критичного значення відбувається різке зменшення її температури та швидкості окислення (криві 1, рис. 2 а,б). Згасання ж частинок в умовах газозавису відбувається у «виродженому» режимі [19] через близькість температур частинок і газу (рис.2 в, г). На залежностях $d(t)$ відсутній чіткий злам, який би характеризував різку зміну режиму окислення.

На рисунку 3 відображено характеристики горіння та згасання двофракційного газозавису при різних початкових температурах нагрітого повітря. Максимальна температура горіння частинок дрібної фракції в області низьких температур газу менша, ніж великих (рис.3, а) внаслідок великих тепловтрат до газу та нестачі окислювача на стадії горіння. Концентрація окислювача на момент займання і горіння дрібних частинок істотно зменшується в результаті витрати кисню при реагуванні з великими частинками, які займаються раніше.

На рис. 3, б представлені залежності діаметрів згасання d_E частинок газозавису від початкової температури нагрітого газу, в якому вони знаходяться. Згасання частинок газозавису відбувається у

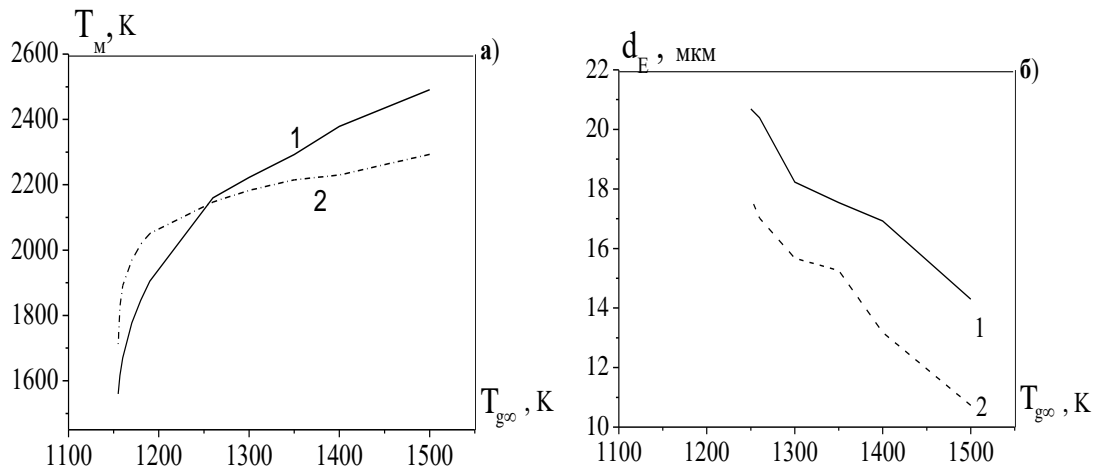


Рис. 3. Залежності максимальної температури горіння T_M (а) і діаметра згасання d_E (б) частинок двофракційного газозавису від початкової температури газу, 1 – $d_{b1}=60$ мкм, 2 – $d_{b2}=120$ мкм.

виродженому режимі, оскільки на завершальній стадії горіння температури частинок і газу відрізняються незначно. При досягненні діаметром частинки критичного значення відбувається слабе зменшення швидкості окислення. Після моменту згасання частинки продовжуються повільно окислюватися в кінетичному режимі [19].

З рис. 3,б випливає, що в умовах газозавису, критичні діаметри затухання d_E великої і дрібної фракцій відрізняються, так як згасання фракцій відбувається при різній плинній температурі газу. Великі частинки згасають при вищій температурі газу і характеризуються меншим діаметром згасання порівняно з дрібними частинками. Для поодинокі частинки діаметр згасання не залежить від початкового діаметра частинки, і визначається лише температурою навколишнього газу.

Висновки

Таким чином, встановлено, що за високих температур газу період індукції дрібної фракції газозавису менше, ніж великої, а при низьких температурах навпаки - більше, що викликано зростанням молекулярно - конвективних тепловтрат до оточуючого газу для дрібної фракції. Показано, що температури займання дрібних і великих частинок за умов двофракційного газозавису практично збігаються, а поодинокі вуглецеві частинки тих самих діаметрів істотно різняться.

Встановлено, що в області низьких температур газу температура горіння частинок дрібної фракції менша, ніж великої фракції. Це пояснюється великим тепловідведенням від дрібних частинок молекулярно-конвективним шляхом і нестачею кисню для стехіометричного співвідношення з паливом на стадії горіння. Кисень витратився при горінні великих частинок, які при низьких температурах газу спалахують раніше.

Розраховано тривалість стійкої високо-температурної стадії тепломасообміну (часу горіння) вуглецевих частинок в умовах двофракційного газозавису, а також критичні діаметри частинок, досягнувши яких вони згасають. Доведено, що на відміну від поодинокі частинки, в умовах газозавису критичний діаметр згасання частинок великої та дрібної фракцій різний, що обумовлено неоднаковою температурою оточуючого газу на момент згасання частинок різного початкового діаметру. При цьому згасання частинок газозавису, на відміну від поодинокі частинки, носить «вироджений» характер.

Орловська С.Г. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та астрономії факультету математики, фізики та інформаційних технологій Одеського національного університету імені І.І.Мечникова;

Зуй О.М. – викладач кафедри комп'ютерних систем та технологій факультету математики, фізики та інформаційних технологій Одеського національного університету імені І.І.Мечникова.

- [1] A. Williams, *Combustion and Gasification of Coal*, (CRC Press, 2000).
- [2] Kai Lei, Buqing Ye, Jin Cao, Rui Zhang, *Combustion characteristics of single particles from bituminous coal and pine sawdust in O_2/N_2 , O_2/CO_2 , and O_2/H_2O atmospheres*, *Energies* 10(11), 1695 (2017); <https://doi.org/10.3390/en10111695>.
- [3] Tom Robl, Anne Oberlink, Rod Jones, *Coal combustion products (CCP's): characteristics, utilization and beneficiation* (Kidlington, Cambridge, MA 2017).
- [4] L. Douglas Smoot, *Fundamentals of Coal Combustion: For Clean and Efficient Use* (Coal science and technology) (Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1993).
- [5] Y.A.Levendis, K. Joshi, R. Khatami, A.F. Sarofim, *Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugar cane bagasse*, *Combustion and Flame*, 158(3), 452 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.007>.

- [6] 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>.
- [7] Juan Riaza, Jon Gibbins, Hannah 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>.
- [8] Juan Riaza, Reza Khatami, Yiannis A. Levendis, Lucía Álvarez, María V. Gil, Covadonga Pevida, Fernando Rubiera, José 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>.
- [9] 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).
- [10] E. Khadzhinov, O.Khadzhinov, *Experimental study of the combustion of single carbon particles in O₂/H₂O and O₂/N₂O environments*, *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical sciences*, 44, 37 (2022); <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.5>.
- [11] H. Lee, S. Choi, *An observation of combustion behavior of a single coal particle entrained into hot gas flow*, *Combustion and Flame*, 162(6), 2610 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.03.010>.
- [12] Juwei Zhang, *Coal Combustion Research Advances (Energy Science, Engineering Technology)*, (Nova Novinka; UK ed. Edition, 2011).
- [13] K. Lee Smith, L. Douglas Smoot, Thomas H. Fletcher, Ronald J. Pugmire, *The Structure and Reaction Processes of Coal* (1994).
- [14] Changkui Lei, Xueqiang Shi, Lijuan Jiang, Cunbao Deng, Jun Nian, Yabin Gao, *Study on the effect of external air supply and temperature control on coal spontaneous combustion characteristics*, *Sustainability*, 15(10), 8286 (2023); <https://doi.org/10.3390/su15108286>.
- [15] Xueqiang Shi, Yutao Zhang, Xiaokun Chen, Yuanbo Zhang, Liu Rui, Ruizhi Guo, Tenglong Zhao, Yin Deng, *Numerical simulation on response characteristics of coal ignition under the disturbance of fluctuating heat*, *Combustion and Flame*, 237(3), 111870 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111870>.
- [16] Xueqiang Shi, Yutao Zhang, Xiaokun Chen, Yuanbo 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>.
- [17] Hongwei Yan et al, *Experimental investigation and evaluation of influence of oxygen concentration on characteristic parameters of coal spontaneous combustion*, *Thermochim. Acta*, 717, 179345 (2022).
- [18] 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>.
- [19] S.G. Orlovskaya, *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.
- [20] A. K. Sadhukhan, P. Gupta, R. K. Saha, *Characterization of porous structure of coal char from a single devolatilized coal particle: Coal combustion in a fluidized bed*, *Fuel Processing Technology*, 90(5), 692 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.010>.
- [21] Dong Xianwei, Li Gaojing, Dong Xuanmeng, Wang Fusheng, *Study on the effect of coal microscopic pore structure to its spontaneous combustion tendency*, *Journal of Sustainable Mining*, 21(2), 4 (2022); <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1351>.
- [22] S. G. Orlovskaya, V.V. Kalinchak, O.N. Zuy. *Effect of an internal reaction on the characteristics of high-temperature heat and mass transfer of gas suspensions of carbon particles*, *High Temperature*, 52(5), 716 (2014); <https://doi.org/10.1134/S0018151X14050149>.
- [23] D.M. Khzmalyan, *Theory of furnace processes*, (Energoatomizdat, 1990).
- [24] Marcio L. de Souza-Santos, *Solid Fuels Combustion and Gasification Modeling, Simulation, and Equipment Operations Second Edition*, CRC Press, 508, (2010); <https://doi.org/10.1201/9781420047509>.
- [25] T. Liu, N. Wang, R. Sun, Z. Cai, W. Tian, R. Jia, *Flame propagation and CO/CO₂ generation characteristics of lignite dust explosion in horizontal pipeline*, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(4), 1384 (2021); <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab067>.
- [26] K. M. Moiseeva, A. Yu. Krainov, A. Kantarbaeva, *Numerical determination of the combustion rate of a gas suspension of coal dust in a propane-air mixture*, *Journal of Physics: Conference Series*, 2057(1):012065 (2021); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012065>.
- [27] K.M. Moiseeva, A.Yu. Krainov, S.I. Goloskokov, M.S. Sazonov, O.Yu. Lukashov, *Experimental and theoretical study of combustion of a coal dust particle-air mixture in a closed spherical volume*, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 59(4), 479 (2023); <https://doi.org/10.1134/s0010508223040111>.
- [28] S.G. Orlovskaya, *Study of regularities of combustion of gas suspensions of carbon particles*, *Physics and Chemistry of Solid State*, 16(1), 210 (2015); <https://doi.org/10.15330/pcss.16.1.210-216>.

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

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

In the work, the regularities of high-temperature heat-mass exchange in two-fraction gas suspensions of carbon particles in heated air are studied. These studies are relevant for predicting high-temperature processes in combustion chambers and determining the main characteristics of these processes: induction period, time and temperature of combustion, critical parameters of ignition and extinction. Physico-mathematical modeling of the problem is carried out on the basis of the equations of heat and mass transfer and chemical kinetics for the components of the gas suspension, taking into account the molecular-convective and radiation mechanisms of heat transfer. The characteristics of ignition, burning, and extinction of a two-fraction gas suspension of carbon particles with equal mass concentrations of small (60 μm) and large (120 μm) fractions in the temperature range of 1100 \div 1500 K were studied; a comparison was made with the characteristics for single particles of the corresponding diameters. It has been proven that when the gas temperature decreases, the induction period of the fine fraction can exceed the induction period of the large fraction, while the combustion temperature of small particles becomes lower than the combustion temperature of large particles. At high gas temperatures (1400K, 1500K), the situation changes to the opposite. The critical ignition and extinction parameters of two-fraction gas suspensions (gas temperatures, particle diameters) were found.

Keywords: heat and mass transfer, ignition, combustion, extinction, gas suspension, carbon particles.