

С.Г. Орловська

Закономірності впливу внутрішнього реагування та масової концентрації на високотемпературний тепломасообмін в газозависах вуглецевих частинок

Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова,
Одеса, Україна, вул. Дворянська 2, 65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru

Проведено дослідження впливу внутрішнього реагування на період індукції, час та температуру горіння, критичні параметри спалахування і затухання вуглецевих частинок в умовах газозавису. Встановлено, що врахування в фізико-математичній моделі внутрішнього реагування призводить до значного зменшення періоду індукції, критичних діаметрів і масових концентрацій частинок, які визначають спалахування і затухання газозависів. Доказано, що для газозависів поруватих частинок значно розширюється діапазон концентрацій, при яких спостерігається повне згорання палива. Виявлено неоднозначний вплив способу зміни масової концентрації на період індукції газозависів.

Ключові слова: високотемпературний тепломасообмін, газозавис вуглецевих частинок, поруватість, масова концентрація, критичні умови спалахування і затухання.

Стаття постуила до редакції 12.11.2011; прийнята до друку 15.03.2012.

Вступ

Розробка оптимальних методів використання твердих вуглецевих палив в енергетиці базується на вивченні закономірностей спалахування, горіння і потухання сукупностей вуглецевих частинок. Частинки вугільного палива мають порувату структуру і при проникненні газоподібного окислювача в середину, на внутрішній поверхні також протікають хімічні реакції. Тоді горіння вуглецевої частинки потрібно розглядати з урахуванням дифузії окислювача в глибину вуглецевого масиву. Коефіцієнт внутрішньої дифузії залежить від розміру пор та їх питомої поверхні [1]. В умовах газозавису роль внутрішнього реагування на різних стадіях високотемпературного тепломасообміну вивчена недостатньо.

В даній роботі в результаті фізико-математичного моделювання проводяться дослідження впливу внутрішнього реагування на критичні (спалахування, затухання) і стійкі (горіння) режими високотемпературного тепломасообміну в газозависах вуглецевих частинок. Допускається, що пори мають сферичну форму, рівномірно розподілені по вуглецевому масиву.

I. Фізико-математична постановка задачі

Високотемпературний тепломасообмін вуглецевих частинок газозавису описується рівнянням теплового балансу, що враховує хімічне тепловиділення, теплообмін частинок з газом та стінками реакційної камери:

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

де c , ρ , d – відповідно, питома теплоємність, густина та діаметр частинки, Дж/кг К, кг/м³, м; T , T_b – поточна та початкова температури частинки, К; t – час, с; q_{ch} – сумарна густина хімічного тепловиділення на поверхні і в порах частинки, Вт/м²; $q_{l.sf}$ – густина теплового потоку молекулярно-конвективним шляхом і стефанівською течією, Вт/м²; q_w – густина теплового потоку випромінюванням від частинки до стінок реакційної камери, Вт/м².

В результаті протікання на зовнішній поверхні і в порах частинок двох гетерогенних хімічних реакцій ($C+O_2=CO_2$ (I), $2C+O_2=2CO$ (II)) змінюються з часом їх діаметр і густина. Швидкість зміни діаметру є швидкістю хімічного реагування на поверхні

частинки $W_{C,s}$, а швидкість зміни її густини [2]:
 визначає швидкість внутрішнього реагування $W_{C,v}$

$$W_{C,s} = -\frac{1}{2} r \frac{\partial(d)}{\partial t} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) n_{O_2,s} r_g, \quad d(t=0) = d_b, \quad (2)$$

$$W_{C,v} = -\frac{1}{6} d \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) n_{O_2,s} \frac{k_v}{k_1 + k_2} \rho_g, \quad \rho(t=0) = \rho_b, \quad (3)$$

де M_C , M_{O_2} – молярні маси вуглецю і кисню, кг/моль; k_1, k_2 – константи швидкостей хімічних реакцій (I) і (II), м/с; $n_{O_2,s}$ – відносна масова концентрація кисню на поверхні вуглецевої частинки; ρ_g – густина газової суміші, кг/м³; d_b , ρ_b – початкові діаметр і густина частинки, м, кг/м³; k_v – ефективна константа внутрішнього реагування, м/с.

Температура газу, в об'ємі газозавису змінюється з часом внаслідок теплообміну з частинками і навколишнім середовищем:

$$c_g r_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = S C_N q_{l, sf} - F_g q_g, \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}. \quad (4)$$

$$q_g = a_g (T_g - T_{g\infty}), \quad F_g = \frac{S_g}{V_g},$$

де b_g – коефіцієнт масообміну газозавису з навколишнім середовищем, м/с; $n_{O_2,\infty}$ – відносна масова концентрація кисню в середовищі, що оточує газозавис.

Сумарну густину хімічного тепловиділення за рахунок хімічних реакцій на зовнішній і внутрішній поверхнях частинки знайдемо із виразу:

$$q_{ch} = (k_1 q_1 + k_2 q_2) P_v \rho_g n_{O_2,s}, \quad (6)$$

$$P_v = 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2},$$

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

де q_1, q_2 – теплові ефекти хімічних реакцій (I) і (II),

де c_g – питома теплоємність газу, Дж/кг К; T_g – температура газу, К; S – поверхня частинки, м²; C_N – чисельна концентрація частинок, м⁻³; q_g – густина теплового потоку між газом і навколишнім середовищем, Вт/м²; F_g – питома поверхня газозавису, м⁻¹; $T_{g\infty}$ – температура газового середовища, що оточує газозавис, К; a_g – коефіцієнт теплообміну газозавису з навколишнім середовищем, Вт/м²К; S_g – поверхня газозавису, м²; V_g – об'єм газозавису, м³.

Для часової залежності відносної концентрації кисню в об'ємі газозавису запишемо рівняння, що враховує зовнішній масообмін з оточуючим газовим середовищем:

$$-\frac{\partial n_{O_2}}{\partial t} = C_N S n_{O_2,s} (k_1 + k_2 + k_v) - F_g b_g (n_{O_2,\infty} - n_{O_2}), \quad n_{O_2}(t=0) = n_{O_2,\infty}, \quad (5)$$

Дж/кг O₂; Se_v – внутрішній критерій Семенова; D_v – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с.

Поверхнева концентрація кисню з урахуванням внутрішнього реагування і стефанівської течії визначається [3]:

$$n_{O_2,s} = \frac{b}{b + (k_1 + k_2 + P_{sf}) \cdot P_v} n_{O_2}, \quad (7)$$

$$P_{sf} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) n_{O_2}.$$

Густини теплових потоків випромінюванням (q_w) і молекулярно-конвективним механізмом ($q_{\lambda, sf}$) на поверхні частинки мають вигляд:

$$q_w = \epsilon S (T^4 - T_w^4), \quad (8)$$

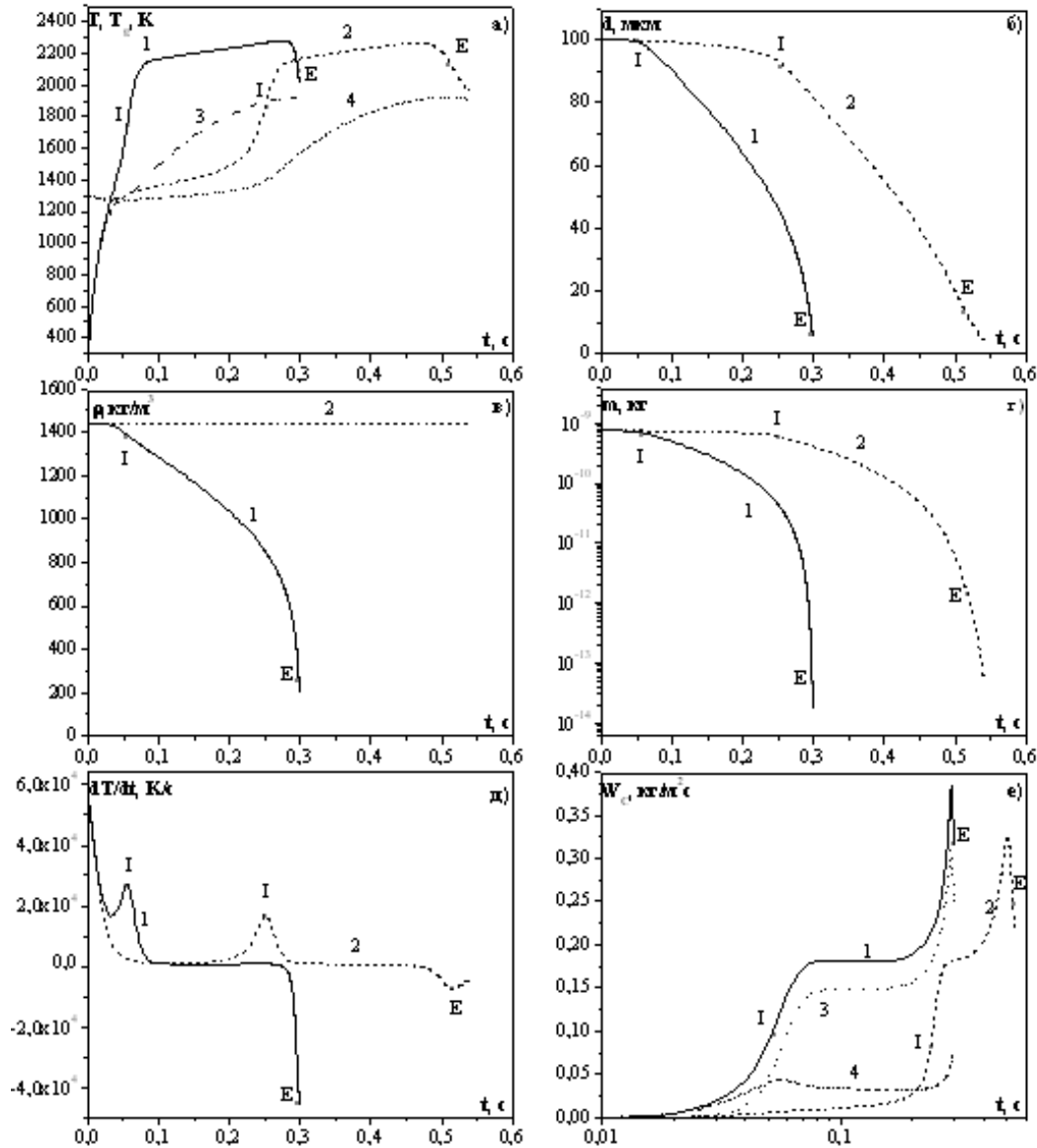


Рис. 1. Часові залежності температури, діаметру, густини і маси частинки, температури газу, часової похідної температури та швидкостей хімічного реагування на поверхні і в порах частинки. $d_b = 100$ мкм, $T_g = T_w = 1300$ К, $C_N = 1,9 \cdot 10^7$ м⁻³, $F_v = 3 \cdot 10^7$ м⁻¹. 1 – газозавис поруватих частинок, 2 – газозавис суцільних частинок; а) 3 – температура газу в газозависі поруватих частинок, 4 – температура газу в газозависі суцільних частинок; е) 1 – W_C , 3 – $W_{C,s}$, 4 – $W_{C,v}$ – для поруватих частинок, 2 – $W_{C,s}$ – для суцільних частинок.

$$q_{1,sf} = a \left[(T - T_g) + \frac{x_{sf}}{2} (T + T_g) \right], \quad (9)$$

$$\xi_{sf} = \frac{P_{sf} P_v}{\beta + (k_1 + 2k_2 + P_{sf}) P_v}. \quad (10)$$

де e – коефіцієнт чорноти вуглецю; T_w – температура стінок реакційної установки, К; ξ_{sf} – безрозмірна швидкість стефанівської течії на поверхні частинки [4]:

II. Вплив внутрішнього реагування на характеристики високотемпературного тепломасообміну в газозависах вуглецевих частинок

Проаналізуємо вплив внутрішньопорового реагування на високотемпературний тепломасообмін і окислення газозависів вуглецевих частинок в повітрі. Частинки з малою внутрішньою поверхнею

($F_V < 10^4 \text{ м}^{-3}$) можна вважати суцільними. На рис. 1 представлені часові залежності температури, діаметру, густини і маси частинки, температури газу, швидкості хімічної реакції (W_C) і похідної температури (dT/dt) для газозависів поруватих і суцільних вуглецевих частинок з початковою масовою концентрацією $C_{mb} = m_b C_N = 0,0144 \text{ кг/м}^3$ (m_b – початкова маса частинки). Для даних умов коефіцієнт надлишку кисню $\eta \approx 3$ [1], тобто його достатньо для повного згорання палива.

Із рис. 1, а випливає, що температура газу в

початковий момент, на стадії займання (до т. І) зменшується через віддачу енергії холодним частинкам газозавису, а потім збільшується в результаті нагрівання його хімічно реагуючими частинками. Порівняння залежностей $T(t)$ и $dT/dt(t)$ (рис. 1, а, д) для газозависів поруватих (криві 1) і суцільних (криві 2) частинок, показує, що період індукції газозависів поруватих частинок в 5 разів менший періоду індукції газозависів суцільних частинок, а час горіння відрізняється значно менше. Додаткове хімічне тепловиділення в порах призводить також до збільшення температури

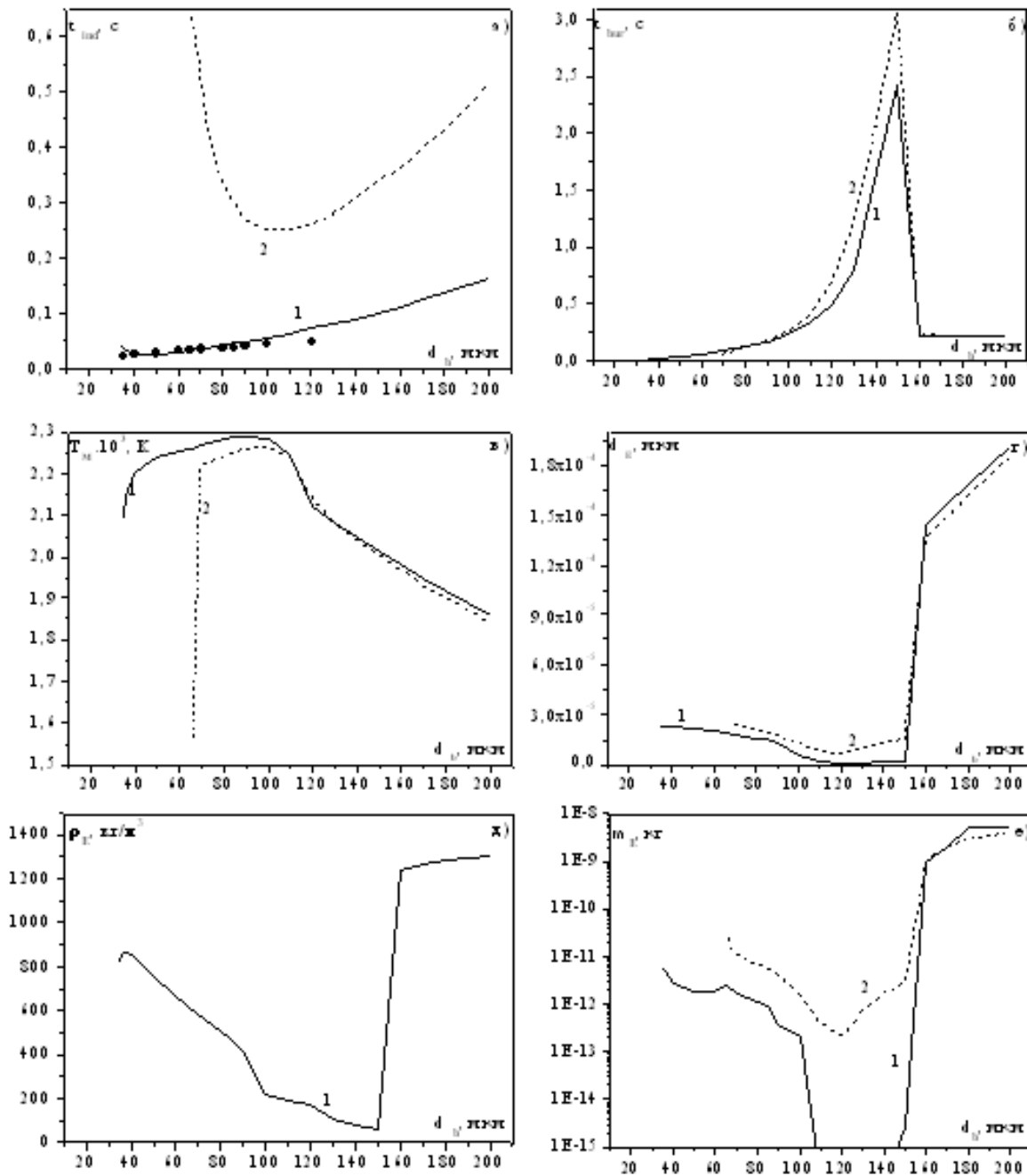


Рис. 2. Залежності $t_{ind}(d_b)$, $t_{bur}(d_b)$, $T_m(d_b)$, $d_E(d_b)$, $r_E(d_b)$, $m_E(d_b)$ для газозависів поруватих (1) та суцільних (2) частинок, ●●● - експеримент [5]. $T_g = T_w = 1300\text{K}$.

горіння частинок газозавису.

На рис. 1, г представлено часові залежності швидкостей хімічних реакцій на зовнішній ($W_{C,s}$) і внутрішній ($W_{C,v}$) поверхнях частинок, які розраховано згідно рівнянь (2) – (3). Для поруватих частинок сумарна швидкість хімічного реагування по вуглецю $W_C = W_{C,s} + W_{C,v}$, для суцільних: $W_{C,v} = 0$ і $W_C = W_{C,s}$. Порівняння вказаних залежностей для газозависів поруватих і суцільних частинок вказує на значну роль внутрішнього реагування на стадії спалахування частинки (до т. І). На цій стадії $W_{C,v} > W_{C,s}$. На стадії горіння (від т. І до т. Е) – навпаки $W_{C,s}$ в 3÷5 разів перевищує $W_{C,v}$. І, як наслідок, з урахуванням внутрішнього реагування значно зменшується час спалахування частинок в порівнянні з часом їх горіння.

За рахунок додаткового тепловиділення в порах на стадії горіння діаметр поруватої частинки зменшується інтенсивніше ніж суцільної (рис. 1, б). Як для поруватої, так і для суцільної частинок режим потухання за даних умов вироджений, тобто немає явного перегину на залежностях $d(t)$ в т. Е, але на стадії затухання спостерігається різке зменшення швидкості хімічного реагування $W_{C,s}$ (рис. 1, е).

Густина поруватої частинки в процесі горіння швидко зменшується (рис. 1, в). І, оскільки, внутрішня поверхня пор чимала ($F_v = 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$) і температура частинки висока, то відбувається подальше вигорання вуглецю в порах і зменшення густини частинки. Це призводить до інтенсивнішого зменшення маси поруватої частинки в порівнянні з суцільною (рис. 1, г). Критична маса поруватої частинки, при якій вона затухає (m_E), на декілька порядків менша, ніж для суцільної. Потухання поруватої частинки відбувається в результаті досягнення її густиною, діаметром, а, отже, і масою

критичних значень (r_E, d_E, m_E , рис. 1, б, в, г).

Отримані нестационарні залежності (рис. 1) дають змогу визначити основні характеристики високотемпературного тепломасообміну газозависів. На рис. 2 представлено залежності періоду індукції (t_{ind}), часу (t_{bur}) і температури горіння (T_m), критичних значень діаметру (d_E), густини (r_E) і маси (m_E) вуглецевої частинки, що визначають затухання, від її початкового діаметру.

Аналіз представлених результатів показує, що внутрішньопорове реагування більше проявляється на стадії виходу частинок на високотемпературний режим (рис. 2, а). Період індукції поруватих частинок (криві 1) значно менший періоду індукції суцільних частинок (криві 2): для дрібних частинок ($d_b < 80 \text{ мкм}$) – більше, ніж в 10 разів, для великих ($d_b > 120 \text{ мкм}$) – в 5 разів.

Кружками на рис. 2, а відмічено експериментальні дані згідно роботи [5]. Спостерігається добре узгодження експериментальних даних з розрахунками при врахуванні внутрішнього реагування і стефанівської течії.

Залежності часу горіння частинок від їх початкового діаметру (рис. 2, б) носять немонотонний характер. Різке зменшення часу горіння в області великих діаметрів ($d_b > 150 \text{ мкм}$) частинок газозавису є результатом недостатці кисню на стадії горіння, внаслідок чого частинки потухають при діаметрах, близьких до початкового. Для нещільних газозависів суцільні частинки горять в 1.5 – 2 рази довше, ніж поруваті.

Менший вплив внутрішнього реагування на час горіння в порівнянні з періодом індукції пояснюється тим, що на стадії горіння кисень більше витрачається на поверхні частинки, ніж в її порах, так як температура поверхні дуже висока.

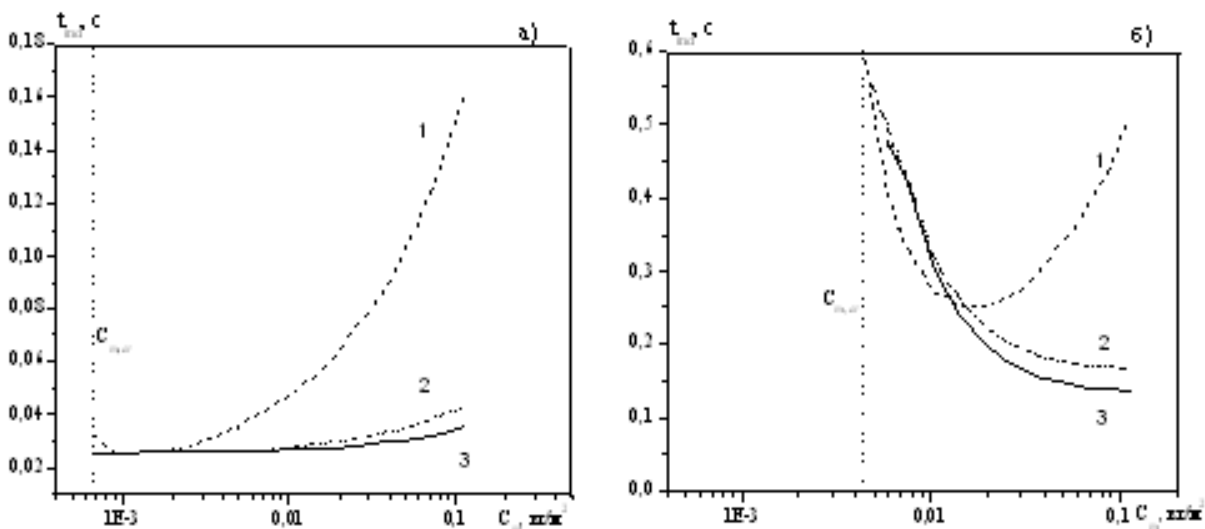


Рис. 3. Залежності періоду індукції газозависів від масової концентрації палива. $T_{g\infty} = T_w = 1300 \text{ К}$. а) поруваті частинки, б) суцільні частинки. 1 – $C_N = 1.9 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, d_b – змінюється; 2 – $d_b = 50 \text{ мкм}$, 3 – $d_b = 40 \text{ мкм}$, C_N – змінюється.

На рис. 1, є показані в порівнянні критичні маси потухання поруватих (1) і суцільних (2) частинок, для нещільних і щільних ($d_b > 150$ мкм) і газозависів. Як видно, критичні маси згаслих частинок щільних газозависів більше, ніж в 100 ÷ 1000 разів перевищують маси згаслих частинок в нещільних газозависах. На залежностях $m_E(d_b)$, $d_E(d_b)$ можна помітити інтервал початкових діаметрів частинок, для яких спостерігається найбільш повне їх вигорання (m_E , d_E – мінімальні). Для газозависів поруватих частинок це $100 < d < 150$ мкм з коефіцієнтами надлишку окислювача $1 < h < 3$. Для газозависів суцільних частинок цей інтервал значно вужчий. Отже, внутрішньопорове реагування істотно розширює діапазон початкових діаметрів частинок, а отже і масових концентрацій вуглецевого палива, в якому спостерігається повне його вигорання.

III. Вплив масової і чисельної концентрацій частинок на характеристики спалахування газозависів

Розглянемо вплив масової концентрації на характеристики спалахування газозависів: період індукції і критичні значення концентрацій і діаметрів частинок, які характеризують спалахування газозависів.

Масову концентрацію можна змінювати двома шляхами: зміною діаметру частинок і зміною їх чисельної концентрації $C_{mb} = \frac{1}{6} \rho d_b^3 r_b C_N$. Тобто одна і та ж масова концентрація може підтримуватись як за рахунок малого розміру частинок і великої їх кількості, так і за рахунок меншої кількості частинок більшого розміру. Величина діаметру частинок впливає на інтенсивність молекулярно-конвективного і радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем, а також на густину хімічного тепловиділення. Збільшення ж кількості частинок призводить до зростання поверхні хімічного реагування. На рис. 3 представлено залежності періоду індукції частинок газозавису від масової концентрації палива для різних випадків зміни масової концентрації: 1) за рахунок зміни діаметру вуглецевих частинок при фіксованій їх кількості ($C_N = \text{const}$), 2) за рахунок зміни чисельної концентрації частинок при фіксованому їх діаметрі ($d_b = \text{const}$).

Аналіз наданих залежностей показує, що при зміні масової концентрації за рахунок діаметру, як для газозависів суцільних частинок, так і для поруватих, на залежностях $t_{ind}(C_m)$ спостерігається мінімум (криві 1), існування якого пов'язано зі збільшенням тепловтрат молекулярно-конвективним

шляхом ($q_{\lambda,cf}$) для області малих діаметрів та із зростанням радіаційних тепловтрат (q_w) для великих діаметрів частинок. При зміні масової концентрації за рахунок збільшення C_N при фіксованому діаметрі, мінімум на залежностях $t_{ind}(C_m)$ для газозависів суцільних частинок зникає (рис. 3, б, (криві 2, 3)), а для газозависів поруватих частинок – ледь помітний (рис. 3, а, (криві 2, 3)). Як видно із порівняння кривих 1 і 2 на рис. 3, для масових концентрацій $C_m > 0.02$ кг/м³, газозавис, який складається з дрібних частинок, спалахує набагато швидше, ніж газозавис крупних частинок. Чим дрібніші частинки в газозависі, тим менше значення періоду індукції при таких же масових концентраціях палива (рис. 3, криві 3). Всі ці явища пояснюються наступним.

Зі зростанням чисельної концентрації збільшується поверхня реагування і теплообміну, в результаті чого газозавис, який складається з великої кількості дрібних частинок, нагріває газ більше, ніж газозавис частинок більшого діаметру при тій же масовій концентрації, але з меншою C_N . Таким чином, в об'ємі газозавису з більш дрібними частинками збільшується рівень температури газу, що сприяє більш швидкому спалахуванню частинок. Чим більше значення C_N , тим сильніше прогривається газ на стадії спалахування частинок. Таким чином, з ростом C_N період індукції буде зменшуватись (рис. 3, криві 2, 3).

Із рис. 3 випливає, що критична масова концентрація, нижче якої спалахування газозависів не спостерігається, для поруватих частинок майже в 7 разів нижча, ніж для суцільних. Відповідно для критичних діаметрів спалахування отримано: $d_{cr} = 35$ мкм для газозависів поруватих частинок і $d_{cr} = 66$ мкм – для газозависів суцільних частинок ($C_N = 1.91 \cdot 10^7$).

Висновки

Доказано, що роль внутрішнього реагування на стадії спалахування більша, ніж на стадії горіння частинок газозавису.

Встановлено, що внутрішньопорове реагування призводить до істотного зменшення періоду індукції і критичних значень діаметру та масової концентрації, нижче яких займання газозавису не відбувається. Це пояснюється збільшенням сумарної густини хімічного тепловиділення за рахунок додаткового виділення тепла при протіканні хімічних реакцій в порах частинок.

Визначено інтервал початкових діаметрів частинок газозавису, для якого спостерігається практично повне вигорання вуглецю. Показано, що внутрішньопорове реагування майже вдвічі розширює цей інтервал. Доказано, що поруваті частинки затухають при досягненні їх діаметром і

густиною, а отже, і масою, критичних значень.

Встановлено, що при зміні масової концентрації за рахунок діаметру (при сталій чисельній концентрації) на залежностях періоду індукції від масової концентрації спостерігається мінімум, який відсутній в разі зміни масової концентрації за

рахунок кількості частинок заданого діаметру.

Орловська С.Г. – к. ф.-м. н., доцент, зав. науково-дослідної лабораторії.

- [1] *Основы практической теории горения* / Под ред. Померанцева В.В. Энергоатомиздат, Л. 312 с. (1986).
- [2] С.Г. Орловская, В.В. Калинин, О.Н. Зуй, М.Н. Чесноков. Тепломассообмен и кинетика химических превращений монодисперсной газовой взвеси пористых углеродных частиц с учетом стефановского течения // *Физика аэродисперсных систем*, (43), сс. 19 – 29 (2006).
- [3] В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.И. Калинин, А.В. Дубинский. Тепломассообмен углеродной частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением // *Теплофизика высоких температур*, **34** (1), сс. 83 – 91 (1996).
- [4] С.Г. Орловська. Вплив колективного ефекту на характеристики високотемпературного тепломасообміну сукупностей поруватих вуглецевих частинок // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (2), 490 – 499 (2011).
- [5] В.В. Курятников. Реакционная способность угля струйного помола // *Физика аэродисперсных систем*, (13), сс. 91-95 (1976).

S.G. Orlovska

Influence of Fuel Mass Concentration and Reactions in-Pores on High Temperature Heat and Mass Transfer in Coal Dusts

I.I. Mechnikov's Odessa National University, Odessa, 65082, Ukraine, (048) 723-62-27

The effect of the reactions in pores is studied on coal particles combustion characteristics: the ignition delay, the burning time and the temperature, the critical parameters of the particles ignition and extinction. It is established that taking into account of the reactions in-pores leads to significant decrease of the ignition delay as well as the particles ignition and extinction critical diameters and the fuel critical mass concentrations. It is shown that the fuel mass concentration range corresponding to full burn-out is appreciably larger in case of the porous particles dusts. It is found that the fuel mass concentration affects ambiguously on the dust ignition delay.

Key words: high temperature heat and mass transfer, coal particles dust, porosity, mass concentration, ignition and extinction critical parameters.