

С.Г. Орловська

Дослідження закономірностей горіння газозависів вуглецевих частинок

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

Проведено фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну та кінетики хімічних реакцій полідисперсного газозавису вуглецевих частинок з урахуванням внутрішнього реагування в порах та стефанівської течії на поверхні частинки. Проведено розрахунки режимів горіння двофракційних газозависів з розмірами частинок, які відрізняються між собою в 2 і 3 рази, при однакових масових концентраціях кожної із фракцій. Показано, що період індукції крупних фракцій двофракційного газозавису значно менший періоду індукції частинок цих же розмірів в умовах монозавису з однаковими масовими концентраціями палива. Для дрібних фракцій встановлено значне зменшення часу горіння в умовах двофракційних систем. Доказано, що двофракційні газозависи мають вищу температуру горіння в порівнянні з монодисперсними газозависами з тими ж розмірами частинок і масовими концентраціями.

Ключові слова: газозавис, вуглецеві частинки, температура, тепломасообмін, займання, горіння, потухання.

Стаття постуила до редакції 11.10.2014; прийнята до друку 15.12.2014.

Вступ

Актуальність дослідження високотемпературних режимів тепломасообміну і хімічних перетворень дисперзованого вуглецевого палива зумовлена необхідністю розробок ефективних методів його використання в різних технологічних процесах. В металургійному виробництві, паливній енергетиці вуглецеве паливо використовується у вигляді газозависів. Дослідженню процесів спалахування і горіння монодисперсних газозависів в літературі приділяється багато уваги. Відомо, що спалахування газозависів частинок можливе при більш низькій температурі, ніж температура запалення поодинокі частинки того ж розміру, а залежність періоду індукції від масової концентрації має характерний мінімум [1-3]. В [4] отримано критичні умови потухання газозависів. Зазначимо, що паливо, яке використовується в енергетичних устроях, в основному має полідисперсний склад [5], так як при його подрібненні утворюються частинки різного розміру. Метою даної роботи є вивчення закономірностей спалахування, горіння і потухання двофракційного газозавису вуглецевих частинок, як окремого випадку полідисперсного палива, з розмірами частинок, які відрізняються в декілька разів між собою.

I. Фізико-математичне моделювання нестационарного тепломасообміну при горінні газозависів вуглецевих частинок

Розглянемо нестационарний тепломасообмін полідисперсного газозавису вуглецевих частинок в повітрі, на поверхні яких протікають дві паралельні хімічні реакції: $C + O_2 = CO_2$ (I), $2C + O_2 = 2CO$ (II) [5]. Рівняння теплового балансу частинки i -тої фракції з урахуванням її теплообміну з газом та стінками реакційної установки запишемо у вигляді:

$$\frac{c r d_i}{6} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{ch i} - q_{a i} - q_{wi}, \quad T_i(t=0) = T_{ib}, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність частинки, Дж/кг К; r_i – густина частинки, кг/м³; d_i – діаметр частинки i -тої фракції, м; T_i, T_{ib} – плинна та початкова температури частинки, К; t – час, с; $q_{ch i}$ – сумарна густина хімічного тепловиділення на поверхні i в порах частинки, Вт/м²; $q_{a i}$ – густина теплового потоку біля поверхні частинки, Вт/м²; q_{wi} – густина теплового потоку випромінюванням від частинки до стінок реакційної установки, Вт/м².

Сумарну густину хімічного тепловиділення за рахунок протікання хімічних реакцій на зовнішній і внутрішній поверхнях частинки, використовуючи [2], знайдемо із виразу:

$$q_{chi} = (k_{1i}q_1 + k_{2i}q_2)P_{vi}r_g n_{O_2,s_i}, \quad (2)$$

$$P_{vi} = 1 + \frac{k_{vi}}{k_{1i} + k_{2i}}, \quad k_{vi} = \frac{2D_{vi}}{d} (Se_{vi} cth Se_{vi} - 1), \quad Se_{vi} = \sqrt{\frac{(k_{1i} + k_{2i})d_i^2 F_{vi}}{4D_{vi}}}, \quad (3)$$

$$k_{1i} = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_i}\right), \quad k_{2i} = k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_i}\right), \quad (4)$$

де k_1, k_2 – константи швидкостей хімічних реакцій (I) і (II), м/с; q_1, q_2 – теплові ефекти хімічних реакцій (I) і (II), розраховані на одиницю маси кисню, Дж/кг O_2 ; r_g – густина газової суміші, кг/м³; $n_{O_2,s}$ – відносна масова концентрація кисню на поверхні вуглецевої частинки; k_v – ефективна константа внутрішнього реагування, м/с; F_v – питома поверхня пор, м⁻¹; Se_v – внутрішній критерій Семенова; D_v – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с; k_{01}, k_{02} – передкспоненційні множники в законі Ареніуса для реакцій (I) і (II), м/с; E_1, E_2 – енергії активації

хімічних реакцій (I) і (II), Дж/моль; P_v – параметр, який враховує внутрішнє реагування, для частинки з малою мережею пор – $k_v = 0$ і $P_v = 1$.

При хімічній взаємодії вуглецю з киснем повітря згідно реакцій (I) і (II) на поверхні частинок газозавису утворюються нові газоподібні маси, що призводить до виникнення стефанівської течії [2,3,5,6], направленої від поверхні частинок. Стефанівська течія впливає, як на теплові, так і масові потоки всіх газоподібних компонент біля поверхні частинок і залежить від їх температури та діаметру [2]. Швидкість цієї течії u_{sf} можна знайти з умови сталості тиску біля поверхні частинки i -тої фракції [2]:

$$u_{sfi} = \frac{P_{sfi} P_{vi} b_i}{b_i + (k_{1i} + 2k_{2i} + P_{sfi}) P_{vi}}, \quad b_i = \frac{D_{O_2} Sh}{d_i}, \quad P_{sfi} = \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_{1i} + 2k_{2i}) n_{O_2,g}, \quad (5)$$

де P_{sf} – швидкість стефанівської течії при протіканні хімічних реакцій в кінетичній області для суцільної (без пор) частинки [3], м/с; β_i – коефіцієнт масообміну частинки i -тої фракції з газом, м/с; D_{O_2} – коефіцієнт дифузії кисню в повітрі, м²/с; Sh – критерій Шервуда; $n_{O_2,g}$ – відносна масова концентрація кисню в об'ємі газозавису; M_c, M_{O_2} – молярні маси вуглецю та кисню, кг/моль.

З урахуванням стефанівської течії і внутрішнього реагування знайдемо вираз для концентрації кисню на поверхні частинки:

$$n_{O_2,s_i} = \frac{b_i}{b_i + (k_{1i} + k_{2i} + P_{sfi}) \cdot P_{vi}} n_{O_2,g}. \quad (6)$$

Теплообмін кожної частинки з газом визначається густиною теплового потоку на її поверхні q_{ai} , яка включає молекулярно-конвективний механізм перенесення тепла і перенесення тепла стефанівською течією [6]:

$$q_{ai} = a_i \left[(T_i - T_g) + \frac{u_{sfi}}{2b_i} (T_i + T_g) \right] \quad (7)$$

$$a_i = \frac{Nu I_g}{d_i}, \quad I_g = I_{g,0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{0.75}, \quad T_* = \frac{T_i + T_g}{2}$$

де a_i – коефіцієнт теплообміну частинки, Вт/м²·К; I_g – коефіцієнт теплопровідності газу при температурі T_* , Вт/м·К; $I_{g,0}$ – коефіцієнт теплопровідності газу при температурі T_0 , Вт/м·К; T_g – температура газу, К.

Використовуючи закон Стефана – Больцмана, запишемо вираз для теплового потоку випромінюванням з одиниці поверхні частинки газозавису до стінок реакційної установки:

$$q_{wi} = e s (T_i^4 - T_w^4), \quad (8)$$

де e – степінь чорноти вуглецю; T_w – температура стінок реакційної установки, К; $s = 5.67$ Вт/м²·К⁴ – стала Стефана-Больцмана.

При горінні газозавису зменшуються з часом діаметр і густина частинок внаслідок протікання хімічних реакцій на їх зовнішній і внутрішній поверхні (всередині пор). Диференційні рівняння масового балансу для діаметру і густини частинки вуглецю i -тої фракції запишемо у вигляді:

$$-\frac{1}{2}r_i \frac{\partial(d_i)}{\partial t} = \frac{M_c}{M_{O_2}}(k_{i_1} + 2k_{2i_1})n_{O_2, s_i} r_g, \quad d_i(t=0) = d_{b_i}, \quad (9)$$

$$-\frac{1}{6}d_i \frac{\partial(r_i)}{\partial t} = \frac{M_c}{M_{O_2}}(k_{i_1} + 2k_{2i_1})n_{O_2, s_i} \frac{k_{vi}}{k_{i_1} + k_{2i_1}} r_g, \quad r_i(t=0) = r_{b_i}, \quad (10)$$

$$r_g = r_{g,0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right), \quad T_* = \frac{T_i + T_g}{2}$$

де d_b – початковий діаметр частинки, м; r_b – початкова густина частинки, кг/м³; $r_{g,0}$ – густина газової суміші при температурі T_0 , кг/м³.

Важливим параметром газозавису є його масова концентрація C_m , яка залежить від діаметра частинок та їх чисельної концентрації C_N :

$$C_m = \sum_{i=1}^n C_{m_i}, \quad C_{m_i} = \frac{1}{6} \rho \cdot d_i^3 \cdot r_i \cdot C_{N_i}, \quad C_{N_i} = \frac{N_i}{V_g}, \quad (11)$$

де C_{m_i} – масова концентрація (кг/м³), а C_{N_i} – чисельна концентрація (м⁻³) i – тої фракції твердої фази газозавису; N_i – кількість частинок в i -й

фракції.

Таким чином, в процесі горіння масова концентрація палива зменшується, так як зменшуються діаметр та густина частинок, а чисельна концентрація є незмінною до моменту повного вигорання.

В умовах газозавису нестационарний тепломасообмін і хімічне перетворення частинок відбуваються так, що змінюються з часом температура газу і концентрація кисню. Диференціальне рівняння, що задає часову залежність температури газу, записується з урахуванням теплообміну газу з частинками і навколишнім середовищем:

$$c_g r_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \sum_{i=1}^n a_i S_i C_{N_i} \left[(T_i - T_g) + \frac{u_{sfi}}{2b_i} (T_i + T_g) \right] + a_g F_g (T_g - T_{g\infty}), \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}, \quad (12)$$

$$a_g = \frac{Nu_g I_g}{d_g}, \quad F_g = \frac{S_g}{V_g},$$

де S_i – площа поверхні частинки i – тої фракції, м²; c_g – питома теплоємність газу, Дж/кг К; $T_{g\infty}$ – температура газового середовища, що оточує газозавис, К; a_g – коефіцієнт теплообміну газозавису з навколишнім середовищем, Вт/м²К; Nu_g – критерій Нуссельта, що задає теплообмін газозавису з

навколишнім середовищем; F_g – питома поверхня газозавису, м⁻¹; S_g – поверхня газозавису, м².

Маса кисню в об'ємі газозавису зменшується в результаті споживання його в хімічних реакціях, та зростає внаслідок зовнішнього масообміну між газозависом і навколишнім середовищем:

$$-\frac{\partial n_{O_2, g}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n C_{N_i} S_i n_{O_2, s_i} (k_{i_1} + k_{2i_1} + k_{vi}) - F_g b_g (n_{O_2, \infty} - n_{O_2, g}), \quad n_{O_2, g}(t=0) = n_{O_2, \infty}, \quad (13)$$

$$b_g = \frac{Sh_g D_g}{d_g}, \quad D_g = \frac{I_g}{c_g r_g},$$

де b_g – коефіцієнт масообміну газозавису з

навколишнім середовищем, м/с; $n_{O_2, \infty}$ – відносна масова концентрація кисню в середовищі, що оточує

гадозавис. Для повітря $n_{O_2,\infty} = 0.23$.

Таким чином фізико-математична модель (1) – (13) описує нестационарний високотемпературний тепломасообмін та кінетику хімічного перетворення поліфракційного газозавису вуглецевих частинок з урахуванням стефанівської течії на їх поверхні і внутрішнього реагування в порах. Розрахунки представлених рівнянь дають змогу визначити основні характеристики горіння газозависів: період індукції, час і температуру горіння, критичні параметри спалахування і затухання.

II. Визначення закономірностей і характеристик горіння двофракційного газозавису

На основі вирішення рівнянь (1) – (13) вивчимо високотемпературний тепломасообмін двофракційного ($i=2$) газозавису вуглецевих частинок при однакових масових концентраціях кожної із фракцій з діаметрами частинок дрібної фракції – 50 мкм та крупної фракції - 100 мкм або 150 мкм. Для початкової масової концентрації газозавису $C_{mb} = 0,0244$ кг/м³ масова концентрація кожної із фракцій складає: $C_{mb1} = C_{m2} = 0,122$ кг/м³.

Чисельні концентрації та кількість частинок (N) дрібної і крупної фракцій розраховувались згідно формул (11).

Для визначення можливості спалювання газозависів різної щільності розраховувався коефіцієнт надлишку окислювача (h), який дорівнює відношенню реального значення концентрації окислювача в об'ємі газозавису до теоретичного, необхідного для повного згорання палива: $h = \frac{n_{O_2,g}}{n_{O_2}}$.

Теоретичне значення n_{O_2} визначається відношенням стехіометричних коефіцієнтів хімічних реакцій та масовою концентрацією вуглецевого палива. Для досліджуваних нами масових концентрацій палива в газозависах коефіцієнт надлишку кисню є близький до одиниці, що відповідає крайньому значенню області помірних газозависів [2].

На рис. 1 представлено часові залежності температур і діаметру частинок кожної із фракцій, температури газу, часові похідні температур частинок, концентрації кисню в газі при спалахуванні, горінні і потуханні газозавису з фракціями частинок, які відічі відрізняються між собою за розмірами: 50 мкм – 100 мкм. Екстремуми на часових залежностях dT/dt (рис. 1, в) визначають

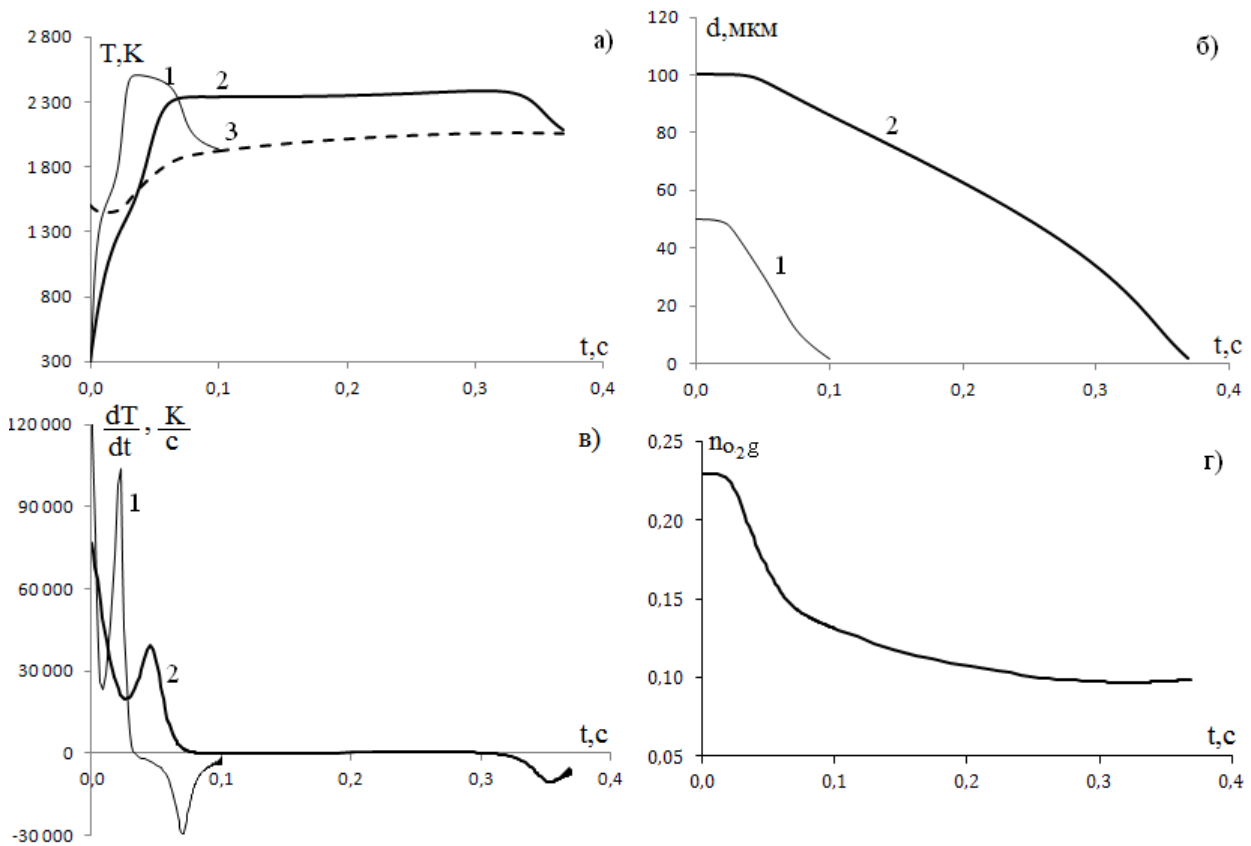


Рис. 1. Залежності T , T_g , dT/dt , d , $n_{O_2,g}$ від часу для двофракційного газозавису при $T_{g\infty} = T_w = 1500$ К.

1- дрібна фракція $d_{b1} = 50$ мкм, $N_1 = 67778$, 2- крупна фракція $d_{b2} = 100$ мкм, $N_2 = 8472$,

3- температура газу T_g .

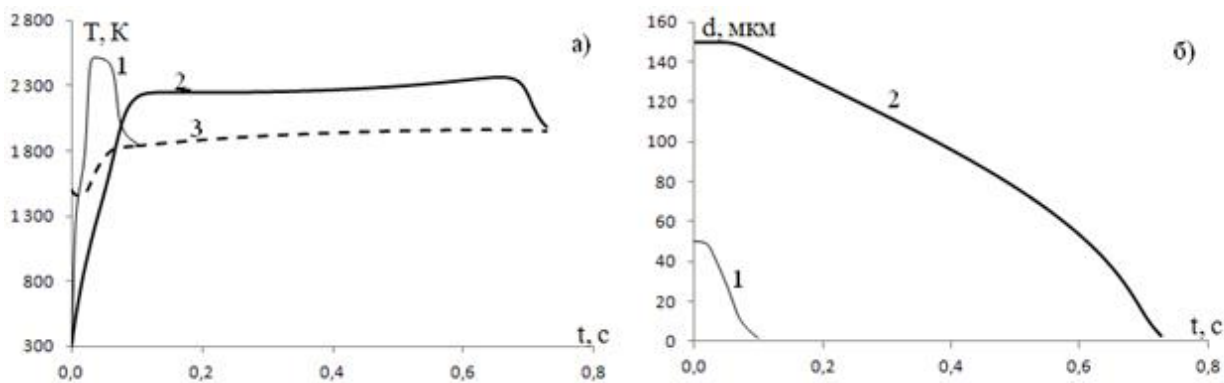


Рис. 2. Високотемпературний тепломасообмін двофракційного газозавису з фракціями: 1 – $d_{b1}=50$ мкм, $N_1 = 67778$, 2 – $d_{b2}=150$ мкм, $N_2 = 2510$, 3 – температура газу. $T_{g\infty} = T_w = 1500$ К.

моменти займання і потухання частинок [2]. Коли похідна dT/dt сягає максимального значення відбувається займання частинок, а час від початку нагрівання до моменту займання визначається як період індукції t_{ind} . Після займання температура частинок збільшується (рис. 1, а), досягає максимального значення (T_{max}), а потім зменшується внаслідок зростання теплового потоку від частинок до газу. Останнє є причиною потухання частинок при досягненні ними критичного діаметру потухання d_E (мінімум dT/dt). Час від моменту займання до моменту потухання визначається, як час горіння частинки t_{bur} .

Аналіз рис. 1,а і 1,б показує, що спочатку відбувається запалення і вигорання дрібної фракції. Це призводить до підвищення температури газу, що покращує умови для займання частинок крупної фракції. Частинки крупної фракції займаються незадовго до моменту потухання дрібних частинок. На протязі вигорання дрібної фракції концентрація окислювача значно зменшується, тому займання і горіння крупних частинок відбувається при низьких її значеннях (рис. 1, г). Внаслідок цього швидкість вигорання крупних частинок менша, ніж дрібних (рис. 1, б). Температура горіння крупної фракції більше, ніж на 100 К нижча (рис. 1, а).

На рис. 2. представлено результати розрахунку теплових режимів та кінетики хімічного реагування двофракційного газозавису для випадку, коли розмір крупної фракції втричі перевищує розмір дрібної

фракції. Як видно, при цьому збільшується різниця між температурами горіння цих фракцій та майже вдвічі зростає час вигорання газозавису в порівнянні з газозависом 50 мкм – 100 мкм (рис. 1).

Проведемо порівняльний аналіз (табл.1) характеристик високотемпературного тепломасообміну двофракційних та монофракційних газозависів дрібних і крупних частинок з тією ж масовою концентрацією, що і двофракційна система ($C_{mb}=0,0244$ кг/м³). Видно, що в умовах двофракційного газозавису запалення крупних частинок відбувається раніше, ніж в умовах монозавису, і тим сильніший цей ефект, чим більший діаметр частинок. Зменшення періоду індукції частинок крупної фракції в двофракційних системах в порівнянні з періодом індукції монозавису частинок цього ж розміру відбувається завдяки підвищенню температури газу внаслідок вигорання дрібної фракції (рис. 1,а).

Для дрібних частинок ($d_b=50$ мкм) при переході від моно- до двофракційних систем спостерігається несуттєве зменшення періоду індукції, що обумовлено збільшенням концентрації кисню на стадії спалахування в останньому випадку. А саме: в умовах монозавису всі частинки палива одночасно використовують кисень на стадії хімічного розігрівання (складової частини періоду індукції), а в двофракційній системі тільки половина палива вступає в хімічну взаємодію з киснем. В зв'язку з цим, на стадії спалахування, кисню в об'ємі монозавису менше, ніж в двофракційній системі, і для його

Таблиця 1.

Характеристики запалення, горіння і погасання монодисперсних газозависів з масовою концентрацією $C_{mb}=0,0244$ кг/м³ та двофракційних газозависів з рівними масовими концентраціями великих і малих частинок ($C_{mb1} = C_{mb2} = 0,0122$ кг/м³) при $T_{g\infty} = T_w = 1500$ К

Характеристики процесу	Монодисперсний газозавис			Двофракційний газозавис			
	50	100	150	50-100		50-150	
d_b , мкм	50	100	150	50-100	50-150	50-100	50-150
t_{ind} , с	0,026	0,054	0,086	0,025	0,045	0,023	0,065
t_{bur} , с	0,075	0,278	0,592	0,047	0,308	0,045	0,638
d_E , мкм	6,6	8,9	13,1	13,3	8,9	13,3	12,3
T_{max} , К	2473	2356	2297	2509	2386	2521	2360

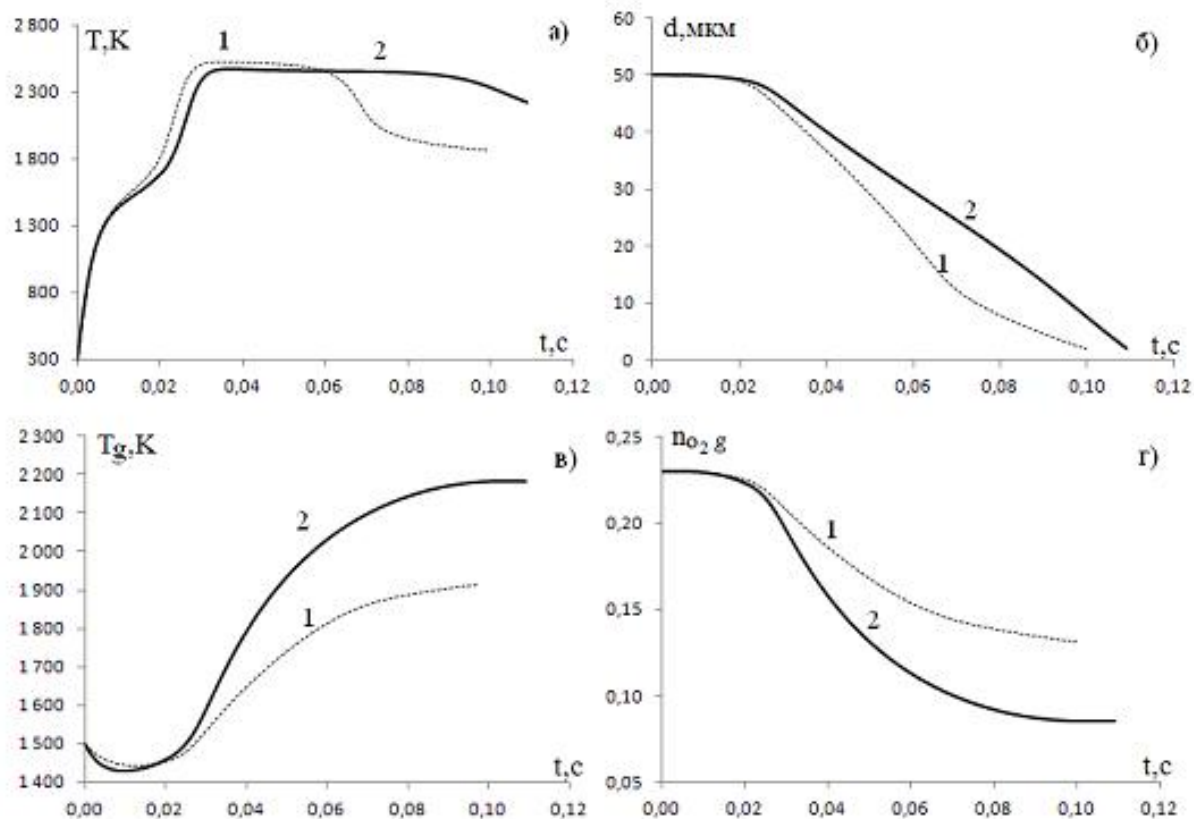


Рис. 3. Часові залежності температури і діаметру дрібних частинок, температури газу та концентрації окислювача при горінні двофракційного (1) і монофракційного (2) газозавису. $d_b=50$ мкм, $T_{g\infty} = T_w = 1500$ К. 1 – $N_I = 6,8 \cdot 10^4$, 2 – $N_2 = 1,3 \cdot 10^5$.

дифундування з оточуючого середовища потрібний деякий час.

Результати, представлені в таблиці 1, приводять до висновку, що час горіння (t_{bur}) частинок в умовах двофракційної системи для дрібної фракції ($d_b=50$ мкм) суттєво зменшується, а для крупної фракції ($d_b=100$ мкм, $d_b=150$ мкм) дещо зростає, в порівнянні з часом горіння частинок цих же розмірів у вигляді монозависів з тією ж масовою концентрацією, що і двофракційний газозавис. Значне зменшення часу горіння дрібних частинок в умовах двофракційної системи пояснюється тим, що в хімічній реакції на початковому етапі горіння задіяна тільки половина палива (дрібна фракція), температура частинок крупної фракції ще низька для протікання хімічних реакцій (рис.1,а). Тому кисню в системі на цій стадії більше, ніж в умовах монозавису, що призводить до збільшення швидкості горіння, і, як наслідок, зменшення часу горіння. Підтвердженням цього є рис.3, де представлені в порівнянні часові залежності температурних та масових характеристик горіння дрібних частинок в умовах моносистеми та двофракційного газозавису з однаковими масовими концентраціями палива.

Із рис.3 випливає, що потухання дрібних частинок в двофракційній системі має чітко виражений характер (криві 1), а в монодисперсному газозависі являється виродженням (криві 2), в зв'язку з підвищенням температури газу і зменшенням різниці

температур частинок і газу. В умовах двофракційної системи горіння частинок дрібної фракції протікає при меншій температурі газу, так як частина тепла витрачається на нагрівання крупної фракції.

Аналіз табл.1 показує, що максимальна температура горіння (T_{max}) двофракційного газозавису вища, ніж монофракційного тієї ж масової концентрації, як для великих, так і дрібних частинок. Діаметри частинок при потуханні (d_E) практично однакові, за винятком діаметру потухання монозавису дрібних частинок. Його зменшення вдвічі ($d_E = 6,6$ мкм) в порівнянні з діаметром потухання в умовах двофракційної системи ($d_E = 13,3$ мкм) пояснюється виродженням режимом потухання, коли відсутня істотна різниця між температурами газу та частинки (рис. 3) і майже немає зміни швидкості хімічного реагування в момент потухання. Із рис.3,б видно, що при потуханні дрібних частинок в двофракційному газозависі в момент потухання швидкість хімічного реагування (швидкість зміни діаметру частинки) помітно зменшується (рис.3,б). Після потухання спостерігається доокислення частинок дрібної фракції в кінетичному режимі і на момент займання крупної фракції їх діаметр становить менше 2 мкм.

Висновки

Отримано, що в умовах двофракційного

газовису запалення частинок крупної фракції відбувається раніше, ніж в умовах монозавису. Цей ефект тим значніший, чим більший діаметр частинок крупної фракції. Доказано, що зменшення періоду індукції частинок крупної фракції у випадку двофракційного газовису відносно періоду індукції монозавису частинок цього ж розміру відбувається завдяки підвищенню температури газу в результаті вигорання дрібної фракції.

Встановлено, що час горіння частинок дрібної фракції в умовах двофракційної системи значно менший за час горіння частинок цих же розмірів в

умовах монозавису з тією ж масовою концентрацією палива. Суттєве збільшення часу горіння дрібних частинок в умовах монодисперсного газовису пояснюється зменшенням концентрації окислювача на стадії запалення частинок.

Доведено, що двофракційні газовиси мають вищу температуру горіння в порівнянні з монодисперсними газовисами з тими ж розмірами частинок і масовими концентраціями.

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

- [1] V.I. Lisicyn, Je.N. Rumanov, B.I. Hajkin. Fizika gorenija i vzryva 7 (1), 3 (1971).
- [2] S.G. Orlovs'ka. Fizika i himija tverdogo tila 12 (2), 490 (2011).
- [3] S.G. Orlovs'ka. Fizika i himija tverdogo tila 13 (2), 544 (2012).
- [4] A.N. Zolotko, T.A. Jakovleva. Fizika gorenija i vzryva, 32 (6), 12 (1996).
- [5] V.V. Pomerancev. Osnovy prakticheskoj teorii gorenija (Jenergija, L. 1973).
- [6] V.V. Kalinchak, S.G. Orlovskaja, A.I. Kalinchak, A.V. Dubinskij. Teplofizika vysokih temperatur, 34 (1), 83 (1996).

S.G. Orlovska

Study of Combustion Characteristics of Carbon Particles Clouds

*Odessa I.I. Mechnikov National University
Odessa, Ukraine, Dvoryanskaya str. 2, 65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru*

High temperature heat and mass transfer and chemical kinetics are modeled in polydisperse cloud of coal particles taking into consideration reactions in pores and Stefan flow at the surface. Burning characteristics are calculated of bimodal aerosol, with the assumption of equal mass concentration of two fractions with two or three-fold difference between the mean particles diameters. It is shown that ignition delay of coarse particles in bimodal aerosol is significantly less than that of equal size particles in monodisperse aerosol. Also a burning time of fine particles is substantially less in bimodal aerosol. It is demonstrated that burning temperature is higher in case of bimodal aerosol in comparison with monodisperse one.

Keywords: aerosol, carbon particles, heat and mass transfer, ignition, burning, extinction.