

В.В. Калінчак¹, О.С. Черненко¹, М.В. Сікорський¹, О.Н Софронков²,
А.В. Федоренко¹

Період індукції і температура горіння холодних газоповітряних сумішей з домішками горючого газу на платиновій частинці (нитці)

¹Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, м. Одеса, Україна, 65000,
e-mail: chernalex@ukr.net

²Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, м. Одеса, Україна, 65000, teplophys@onu.edu.ua

У роботі аналітично знаходиться період індукції і температура каталітичного горіння на металевій частинці (нитці) холодних газоповітряних сумішей з домішками горючих газів на прикладі безполум'яного горіння газоповітряних сумішей з домішками водню на платиновій нитці. Стійке безполум'яне горіння спостерігається через період індукції в результаті підвищення початкової температури частинки каталізатора вище критичної температури запалювання, яка залежить від приведенного діаметру частинки і концентрації домішки горючого газу. Весь час виходу поділено на дві частини: при протіканні каталітичної реакції в перехідній і дифузійній областях. Показано, як впливає концентрація домішки горючого газу, приведений діаметр каталізатора та перевищення початкової температури над температурою запалювання на тривалість окремих стадій та період індукції.

Ключові слова: металеві каталізатори окислення, платинова нитка, водень, період індукції, запалювання, самозаймання, погасання, поверхнєве (безполум'яне) горіння.

Стаття постуила до редакції 19.02.2018; прийнята до друку 05.03.2018.

Вступ

Каталізатори в дисперсному вигляді відіграють виключну роль не тільки в природі, а й в промисловості, де широке застосування отримала металічна платина [1]. Каталітичне горіння газів протікає безпосередньо на поверхні твердих каталізаторів без відкритого полум'я в газовій суміші. На вимірюванні кількості теплоти, що виділяється в режимі безполум'яного горіння, основана робота термокаталітичного газоаналізатора [2]. В той же час необхідно знати час (період індукції), через який газоаналізатор перейде в робочий режим.

Експериментально показано [3], що каталітичне горіння газоповітряної суміші з домішкою водню чи аміаку на тонкому платиновому дротику стає самопідтримуючим в стійкому стаціонарному режимі після вимкнення електричного струму через дротину, якщо концентрація домішки горючого газу вища деякого критичного значення концентрації згасання

при заданій температурі холодної газоповітряної суміші [4]. Такий же ефект відбувається при зниженні температури газоповітряної суміші до будь якої низької температури. У таких умовах поверхнєве (безполум'яне) горіння газоповітряних сумішей з домішками горючого газу можливе при перевищенні початкової температури нитки каталізатора вище певного критичного значення – температури каталітичного запалювання. Критичне значення початкової температури каталізатора лежить в межах між температурами каталітичного самозаймання і погасання даної газоповітряної суміші на даному каталізаторі: $T_i < T_{b,i} < T_e$ [4].

Метою даної роботи стало визначення часу затримки каталітичного запалювання газоповітряних сумішей з домішками горючого газу, реагування якого на металевій нитці (частинці) протікає за реакцією першого порядку.

I. Постановка задачі

Проведемо аналіз розв'язків рівняння

термодинаміки металеві нитки (частинки) каталізатора, яка знаходиться в стаціонарній газоповітряній суміші з домішкою горючого газу. При цьому використовуємо припущення:

1. Термічний опір металеві нитки (частинки) каталізатора значно менший в порівнянні з опором газоповітряної суміші (критерій Біо значно менший одиниці). Це дає право знехтувати розподілом температури по каталізатору;

2. Поля температур і концентрацій в газовій фазі квазістаціонарні, тому що коефіцієнт температуропровідності газоповітряної суміші значно більший від коефіцієнта температуропровідності металевого каталізатору;

3. Тепловтратами на випромінювання знехтуємо в зв'язку з малістю розміру каталізатора;

4. Тепломасообмін частинки з газоповітряною сумішшю описується за допомогою аналогії Льюїса і закону Ньютона Ріхмана (швидкість тепловідводу молекулярно-конвективними механізмами q_h);

5. Швидкість хімічного тепловиділення q_{ch} і швидкість гетерогенної реакції на поверхні частинки

підкоряється кінетиці першого порядку за концентрацією домішки та збільшується з температурою за законом Арреніуса.

При вищеназваних припущеннях диференціальне рівняння частинки каталізатора, як відкритої системи для стаціонарного газоповітряного потоку, набуде вигляду

$$c_c \rho_c \frac{V_c}{S_c} \frac{\partial T}{\partial \tau} = q_{eff}, \quad q_{eff} = q_{ch} - q_h, \quad (1)$$

$$T(\tau=0) = T_b,$$

де T – температура нитки (частинки) каталізатора, К; τ – час, с; q_{ch} , q_h – відповідно швидкість

тепловиділення та тепловідводу, Вт/м²; q_{eff} –

ефективне тепловиділення, Вт/м²; V_c / S_c –

відношення об'єму каталізатора до площі поверхні, м;

c_c – питома теплоємність каталізатора, Дж/кг·К; ρ_c – густина каталізатора.

Швидкість хімічного тепловиділення [5]:

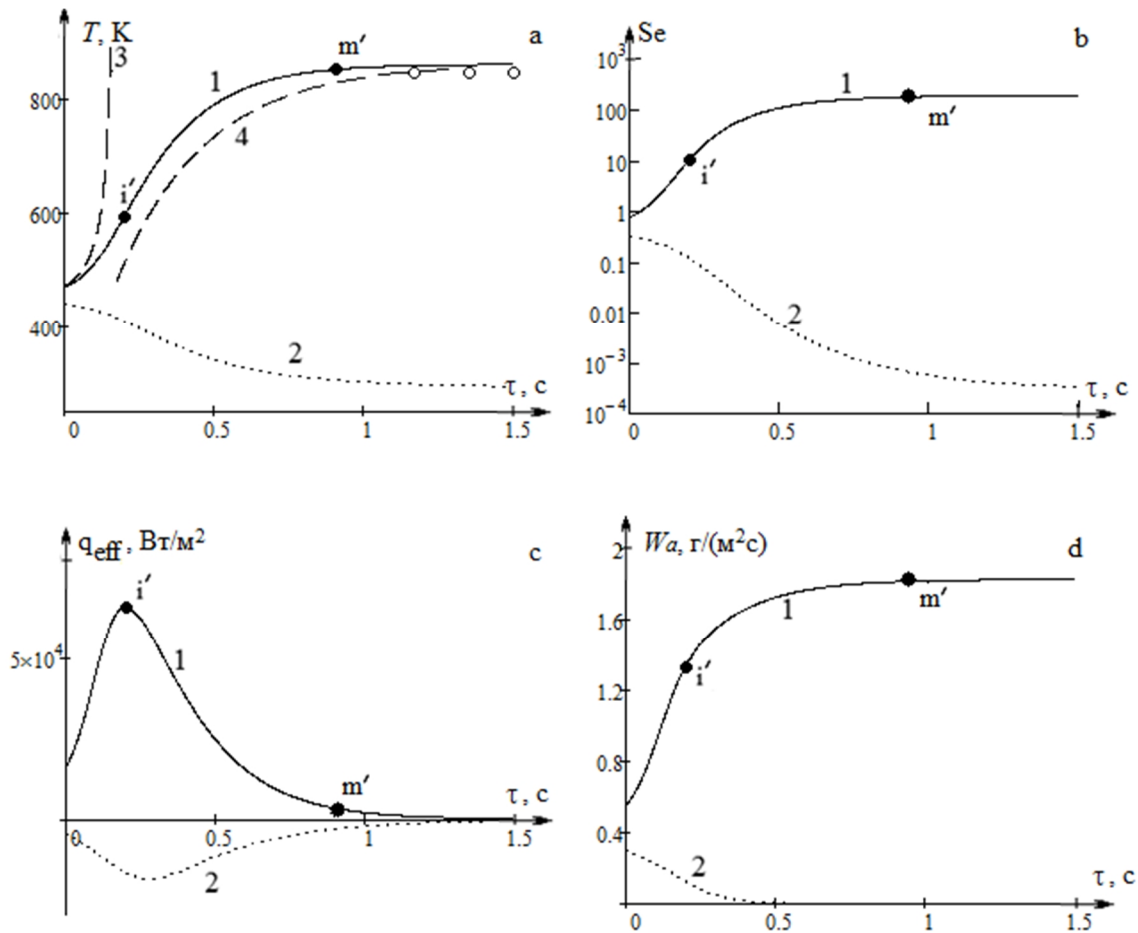


Рис. 1. Часові залежності: а) температури платинової нитки, б) дифузійно-кінетичного відношення, с) ефективної потужності тепловиділення, д) швидкості реакції по активному горючому компоненту в газовій суміші температури $T_g = 293$ К з домішкою водню $Y_a = 0,19$ %. Початкова температура нитки: $T_{b1} = 470$ К, $T_{b2} = 440$ К. Критичні значення початкової температури: $T_{b,i1} = 448$ К. Діаметр нитки 0,1 мм, число Шервуда $Sh = 0,5$. Приведений діаметр 0,2 мм. Час затримки запалювання (час досягнення точки m'): крива 1 – $\tau_{ign} = 0,906$ с. о – експеримент [3, С. 416]. Крива 1, 2 – розв'язок (1), крива 3 – розв'язок (9), крива 4 – розв'язок (10).

$$q_{ch} = Q_a W_a = Q_a k \rho_{g,s} \frac{Y_a (1 + \Psi_T)}{1 + Se},$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \Psi_T = (2-n) \frac{T - T_g}{T} Le^m,$$

$$Se = \frac{k \cdot \rho_{gs}}{\beta \cdot \rho_g}, \quad \beta = \frac{D \cdot Sh}{d}, \quad D = D_0 \left(\frac{T_*}{T_0}\right)^n, \quad T_* = \frac{T + T_{g*}}{2},$$

де T_g – температура газоповітряної суміші К; β – коефіцієнт масопереносу, м/с; n – степінь в температурній залежності коефіцієнту дифузії горючого газу.

Швидкість тепловідводу від нагрітої нитки (частинки) каталізатора до холодної газоповітряної суміші за законом Ньютона-Ріхмана

$$q_h = \alpha(T - T_g) = c_{p,g} \rho_g \beta Le^{-1+m} (T - T_g),$$

$$\alpha = c_{p,g} \rho_g \beta Le^{-1+m},$$

де T_g – температура газоповітряної суміші К; α – коефіцієнт теплообміну; m – степінь в залежності числа Шервуда від числа Шмідта $Sh \sim Sc^m$ [3, С. 406].

На рис. 1 зображені часові залежності температури нитки каталізатора (рис. 1, а), дифузійно-кінетичного відношення (рис. 1, б), ефективної потужності тепловиділення (рис. 1, с) і швидкості реакції по активному горючому компоненту в газовій суміші (рис. 1, д) з різною початковою температурою каталізатора в газоповітряній суміші кімнатної температури. Криві 1 відповідають каталітичному запалюванню, а криві 2 – його відсутності. Гранична початкова температура T_{i*} , вище якої спостерігається запалювання, називається температура каталітичного запалювання. Її значення знайдені з нестационарної задачі і вказані в підпису до рис. 1. Зі зменшенням концентрації домішки горючого газу її значення монотонно збільшується. Час запалювання залежить від різниці початкової температури і температури запалювання: чим вона менша, тим більший час запалювання.

Також зменшення концентрації домішки горючого газу приводить до збільшення часу затримки запалювання. Весь час виходу τ_{ign} до точки m' (точка m' – кінець нестационарної стадії горіння, $T_{m'} = 0,99T_m$) на високотемпературний режим каталітичного окислення можна розділити на дві стадії точкою i' (точка перегину на часовій залежності температури каталізатора, максимум на ефективній потужності тепловиділення). При цьому дифузійно-кінетичне відношення (число Семенова Se) є величиною більшою за одиницю (рис. 1, б), а швидкість хімічної реакції не досягає стаціонарного стійкого значення.

Розрахунки для випадку каталітичного горіння водню проводилися при наступних значеннях параметрів [3]: платинова нитка діаметром 100 мкм, $E = 55$ кДж/моль, $k_0 = 0,8 \cdot 10^6$ м/с, $Q_a = 120,9$ МДж/кгН₂, $D_0 = 0,6 \cdot 10^{-4}$ м²/с, $m = 0,33$, $n = 1,82$, $Sh = 0,51$ ($U = 0,15$ м/с), $T_0 = 293$ К, $\lambda_{g0} = 0,024$ Вт/(м·К), $\rho_{g0} = 1,293$ кг/м³, $c_{g0} = 1005$ Дж/(кг·К), $c_c = 131$ Дж/(кг·К), $\rho_c = 21460$ кг/м³.

II. Визначення температури запалювання

Для ілюстрації умов запалювання газоповітряної суміші з домішкою водню (рис. 2) проведемо аналіз $q_{eff}(T, Y_a)$ при трьох приведених діаметрах платинової нитки. Потужність хімічного тепловиділення в дифузійній області вибрана як масштабна величина

$$q_{dif} = Q_a \beta \rho_g Y_a = Q_a \frac{Sh \cdot D}{d} \rho_g Y_a.$$

Бачимо, що для здійснення каталітичного запалювання холодної газоповітряної суміші

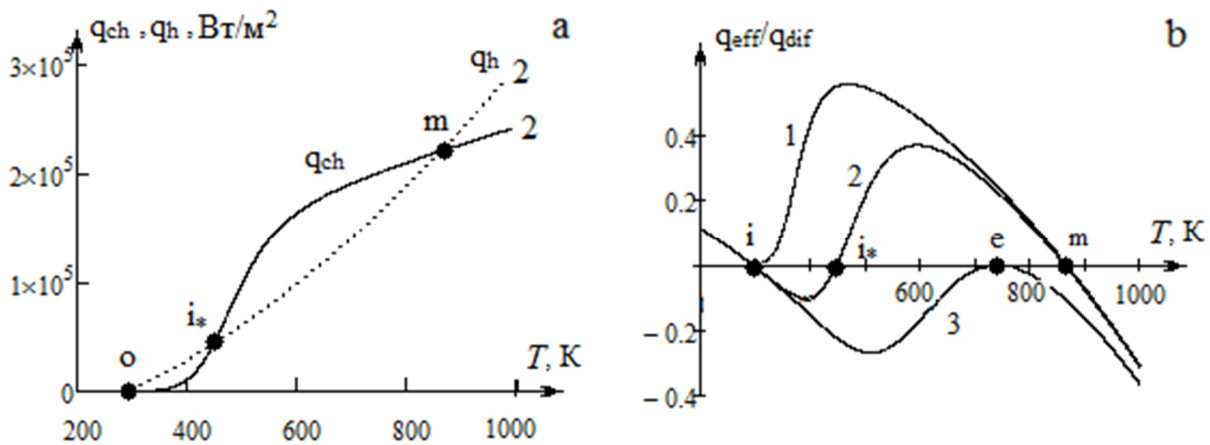


Рис. 2. Залежності $q_{ch}(T)$, $q_h(T)$, $q_{eff}(T)/q_{dif}$ від температури платинової нитки в холодній газоповітряній суміші ($T_g = 293$ К) з домішкою водню $Y_a = 0.0019$. а) Суцільна крива – швидкість хімічного тепловиділення $q_{ch}(T)$, пунктирна крива - швидкість тепловідводу $q_h(T)$, приведений діаметр 0,2 мм; б) Ефективне тепловиділення $q_{eff}(T)/q_{dif}$, приведений діаметр платинового каталізатора: 1) 7,3 мм, 2) 0,2 мм, 3) 11 мкм.

необхідно, щоб початкова температура каталізатора $T(0) = T_b$ була більшою за критичну початкову температуру запалювання T_{i*} (точка i_* (рис. 2, крива 2) при концентрації домішки Y_a , які повинні відповідати умові порушення стійкості стаціонарності:

$$\text{точка } i_*: \quad q_{eff} = 0, \quad \left. \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} \right|_{b,i} > 0.$$

Температура горіння T_m (рис. 2, точка m) задовольняє умові стійкості стаціонарних станів:

$$\text{точка m:} \quad q_{eff} = 0, \quad \left. \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} \right|_m < 0.$$

При запалюванні критична початкова температура каталізатора (температура запалювання) повинна бути більшою температури самозаймання і меншою температури погасання: $T_i < T_{b,i} < T_e$.

Ці граничні температури відповідають умовам

$$Q_a k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{b,i}}\right) (1 + \psi_T) \rho_g Y_a = \beta c_g \rho_g Le^{-1+m} (T_{b,i} - T_g) \left[1 + \frac{k_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_{b,i}}\right)\right].$$

Із цієї рівності виразимо коефіцієнт масообміну та приведений діаметр як функції стаціонарної температури $T_{b,i}$

$$\beta = \left(\frac{T_m - T_{b,i}}{T_{b,i} - T_g}\right) k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{b,i}}\right) \text{ та} \\ \frac{d}{Sh} = \left(\frac{T_{b,i} - T_g}{T_m - T_{b,i}}\right) \frac{D}{k_0} \exp\left(\frac{E}{RT_{b,i}}\right). \quad (2)$$

Величину d/Sh назвемо приведеним діаметром. Для каталізатора у вигляді сфери (частинка) та циліндра (дріт) з однаковим приведеним діаметром температура займання, як і інші параметри, рівні.

На рис. 3, а, б зображені отримані функції (2) в напівлогарифмічних координатах. Вони дозволяють отримати для заданих умов температуру каталітичного запалювання. Температура запалювання в залежності від коефіцієнта масообміну (діаметра каталізатора) може змінюватися в широкому інтервалі. При цьому відповідні значення числа Семенова не є малими.

Для значного діапазону температур запалювання біля точки T_i число Семенова менше одиниці $Se_{b,i} < 1$. Для діапазону температур запалювання біля точки T_e число Семенова більше одиниці $Se_{b,i} > 1$.

Значенню $Se_{b,i} = 1$ відповідає температура

$$\text{запалювання } T_{Q/2} = T_g + \frac{T_Q}{2}.$$

При даних параметрах і масовій частці водню Y_a

самозаймання та згасання (точки і та е, рис. 2, б):

$$q_{eff} = 0, \quad \left. \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} \right|_{i,e} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 q_{eff}}{\partial T^2} \right|_e < 0, \\ \left. \frac{\partial^2 q_{eff}}{\partial T^2} \right|_i > 0.$$

Їх можна оцінити як

$$T_i \approx T_g + RT_g^2 / E \quad \text{і} \quad T_e = T_m - RT_m^2 / E,$$

$$\text{де} \quad T_m = T_Q + T_g, \quad T_Q = \frac{Q_a Y_a}{c_g} (1 + \psi_T) Le^{1-m},$$

$$\psi_T \approx (2-n) \left(1 - \frac{T_g}{T_g + Q_a Y_a Le^{1-m} / c_g}\right) Le^m.$$

Температуру запалювання, як стаціонарну температуру, визначимо з рівності

= 0,0019 значення граничної температури $T_{Q/2} = 575$ К. Вона відповідає приведеному діаметру нитки $d/Sh = 20,5$ мкм.

При $T_i < T_{b,i} < T_{Q/2}$ і $Se_{b,i} < 1$ залежність (2) є практично експоненціальною $\ln \beta = a_1 T + b_1$ (рис. 3, б), а при $T_{Q/2} < T_{b,i} < T_e$ і $Se_{b,i} > 1$ залежність (2) близька до лінійної $\beta = a_2 T + b_2$ (рис. 3, д). Можливість використання наближених формул (3, а) та (3, б) можна простежити на рис. 2, б та 2, д, де межею служить точка Q/2.

Тоді, для аналітичної оцінки температури запалювання в області, близькій до температур самозаймання, можна використовувати наближену залежність

$$T_{b,i} \approx T_i + (T_{Q/2} - T_i) \frac{\ln(\beta / \beta_i)}{\ln(\beta_{Q/2} / \beta_i)}. \quad (3, а)$$

Так, якщо для діаметра платинової нитки 100 мкм (коефіцієнт масообміну $\beta = 0,785$) критичне значення температури запалювання з (2) становить 448 К, а із залежності (3, а) – 476 К.

Для аналітичної оцінки температури запалювання в області, близькій до температури погасання, можна використати наближену залежність:

$$T_{b,i} \approx T_i + (T_{Q/2} - T_i) \frac{\beta - \beta_e}{\beta_{Q/2} - \beta_e}. \quad (3, б)$$

III. Перша стадія часу запалювання

Для оцінки часу затримки запалювання зручно розглянути задачу (1) в безрозмірному вигляді. Для початку коефіцієнт теплообміну виразимо через

стаціонарну температуру

$$\alpha = \frac{1}{T_{b,i} - T_g} Q_a k_{b,i} \rho_{g,s} \frac{Y_a (1 + \psi_T)}{1 + Se_{b,i}},$$

і підставимо в (1):

$$c_c \rho_c \frac{V_c}{S_c} \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q_a k_{b,i} \rho_{g,s} \frac{Y_a (1 + \psi_T)}{1 + Se_{b,i}} - Q_a k_{b,i} \rho_{g,s} \frac{Y_a (1 + \psi_T)}{1 + Se_{b,i}} \cdot \frac{T - T_g}{T_{b,i} - T_g}, \quad T(0) = T_b, \quad (4)$$

Як безрозмірні температуру та час зручно вибрати величини, які застосовувалися Франк-Каменецьким [3]. Відмінною особливістю тут є використання критичної температури запалювання $T_{b,i}$ як характерної температури:

$$\theta = \frac{T - T_{b,i}}{RT_{b,i}^2} E, \quad \theta_g = \frac{T_g - T_{b,i}}{RT_{b,i}^2} E,$$

$$\% = \frac{\tau}{\tau_{ch}}, \quad \tau_{ch} = \frac{c_c \rho_c V_c}{S_c q_{ch}(T_{b,i})},$$

$$q_{ch}(T_{b,i}) = Q_a k_{b,i}(T_{b,i}) \rho_{g,s} \frac{Y_a (1 + \psi_T)}{1 + Se_{b,i}},$$

$$k_{b,i}(T_{b,i}) = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{b,i}}\right),$$

$$Se_{b,i} = \frac{k_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_{b,i}}\right),$$

де $Se_{b,i}$ – число Семенова при стаціонарній критичній температурі запалювання.

У результаті маємо задачу (4) в безрозмірному вигляді:

$$\frac{d\theta}{d\%} = \left(\frac{1 + Se_{b,i}}{1 + Se_{b,i} \exp\theta} \right) \exp\theta - \left(\frac{\theta}{|\theta_g|} + 1 \right),$$

$$\theta(\% = 0) = \theta_b, \quad (5)$$

$$\bar{q}_{ch} = \left(\frac{1 + Se_{b,i}}{1 + Se_{b,i} \exp\theta} \right) \exp\theta, \quad \bar{q}_h = \left(\frac{\theta}{|\theta_g|} + 1 \right).$$

При $\theta_b = 0$ з (5) видно, що $\frac{d\theta}{d\%} = 0$.

Якщо $T_b > T_{b,i}$ або $\theta_b > 0$, то відбувається каталітичне запалювання і безполум'яне горіння газоповітряної суміші на частинці каталізатора. При $T_b < T_{b,i}$ або $\theta_b < 0$ каталізатор охолоджується.

Тоді період індукції

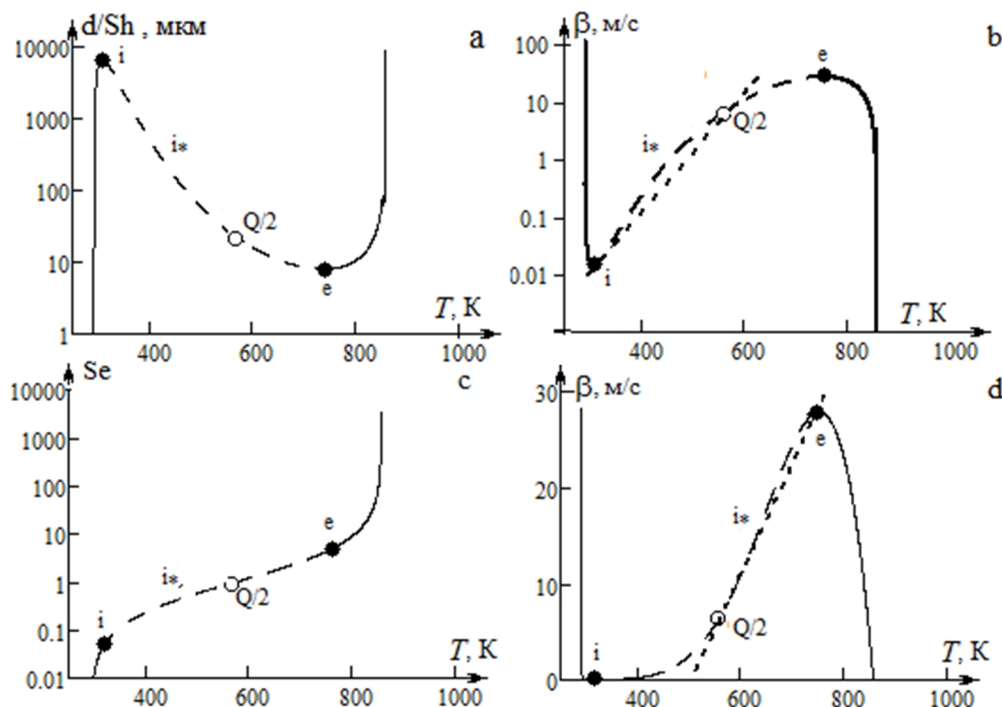


Рис. 3. Залежності а) приведенного діаметра, б) і д) стаціонарного коефіцієнта масообміну та в) числа Семенова від стаціонарної температури платинового каталізатора в газовій суміші температури $T_g = 293$ К з домішкою водню $Y_a = 0,0019$. Пунктирна пряма: рис.б – (3, а), рис.д – (3, б).

$$\%_{ind} = \int_{\theta_b}^{\infty} \frac{d\theta}{\left(\frac{1+Se_{b,i}}{1+Se_{b,i} \exp \theta} \right) \exp \theta - \left(\frac{\theta}{|\theta_g|} + 1 \right)}, \quad (6)$$

$$\left(\frac{1+Se_{b,i}}{1+Se_{b,i} \exp \theta} \right) \exp \theta \approx 1 + \frac{1}{1+Se_{b,i}} \theta + \frac{1-Se_{b,i}}{2(1+Se_{b,i})^2} \theta^2.$$

Тоді (6) набуде вигляду:

При $\theta < 1$ розкладаємо в ряд Маклорена функцію

\bar{q}_{ch}

$$\%_{ind,1} \approx \int_{\theta_b}^{\infty} \frac{2d\theta}{\frac{1-Se_{b,i}}{(1+Se_{b,i})^2} \theta^2 + 2\theta \left(\frac{1}{1+Se_{b,i}} - \frac{1}{|\theta_g|} \right)} = \frac{(1+Se_{b,i})|\theta_g|}{(|\theta_g| - (1+Se_{b,i}))} \ln \left(1 + \frac{2(|\theta_g| - (1+Se_{b,i}))(1+Se_{b,i})}{\theta_b |\theta_g| (1-Se_{b,i})} \right), \quad (7)$$

У розмірному вигляді (7) запишеться як:

$$\tau_{ind,1} = \tau_{ch} \frac{(1+Se_{b,i})|\theta_g|}{(|\theta_g| - (1+Se_{b,i}))} \ln \left(1 + \frac{2(|\theta_g| - (1+Se_{b,i}))(1+Se_{b,i})}{|\theta_g| \theta_b (1-Se_{b,i})} \right), \quad (8)$$

При малих числах Семенова $Se_{b,i} \ll 1$

$$\%_{ind} \approx \int_{\theta_b}^{\infty} \frac{2d\theta}{\theta^2 + 2\theta \left(1 - \frac{1}{|\theta_g|} \right)} = \frac{|\theta_g|}{|\theta_g| - 1} \ln \left(1 + \frac{2(|\theta_g| - 1)}{\theta_b |\theta_g|} \right).$$

Звідси видно, що однією з необхідних умов являється $|\theta_g| > 1$.

Залежність температури каталізатора з часом на першій стадії наближено можна описати

$$\tau(T) = \tau_{ch} \int_{\theta_b}^{\frac{(T-T_s)E/RT_s^2}{\theta_b}} \frac{2d\theta}{\frac{1-Se_{b,i}}{(1+Se_{b,i})^2} \theta^2 + 2\theta \left(\frac{1}{1+Se_{b,i}} - \frac{1}{|\theta_g|} \right)} \quad (9)$$

Отриману формулу (7) можна використовувати при $Se_{b,i} < 1$, що задовольняє широкому інтервалу розмірів каталізатора.

IV. Друга стадія часу запалювання

Друга стадія характеризується переходом реакції в глибоку дифузійну область і наближенням із заданою похибкою δ (наприклад 1 %) температури каталізатора до стаціонарної температури каталітичного горіння $T_m = T_Q + T_g$ [6].

Рівняння для визначення часу цієї стадії можна представити у вигляді:

$$\frac{V_c}{S_c} c_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q_a (1 + \psi_T) k \rho_{gs} Y_a \frac{1}{Se} - \alpha (T - T_g), \quad (10)$$

Час цієї стадії визначатиметься як інтеграл:

$$\tau_2 = \frac{V_c c_c \rho_c}{S_c \alpha} \frac{T_m (1-\delta)}{T_2} \int_{T_2}^{T_Q + T_g} \frac{dT}{T_Q + T_g - T}.$$

Нижню межу інтегралу можна без значної похибки встановити за початкову температуру каталізатора $T_2 = T_{b,i} + RT_{b,i}^2 / E$. У результаті

Таблиця 1

Тривалість стадій затримки каталітичного запалювання газової суміші з домішкою водню на платиновій нитці ($T_b = 470$ К, $d/Sh = 200$ мкм, $T_g = 293$ К)
Вплив концентрації домішки горючого газу

Y_a	$T_{b,i}$, К	T_m , К	θ_b	θ_g	$Se_{b,i}$	$\tau_1 / \tau_{1(1)}$, с/с	$\tau_2 / \tau_{2(1)}$, с/с	$\tau_{ind} / \tau_{ind(1)}$, с/с
0,0019	448	862	0,73	-5,1	0,4	0,16/0,20	0,76/0,71	0,93/0,91
0,0015	467	730	0,09	-5,28	0,72	0,56/0,47	0,69/0,68	1,24/1,16

Таблиця 2

Тривалість стадій затримки каталітичного запалювання газової суміші з домішкою водню на платиновій нитці ($T_b = 470$ К, $Y_a = 0.0019$, $T_g = 293$ К, $Sh = 0.5$)
Вплив діаметра каталізатора

d/Sh , мкм	$T_{b,i}$, К	T_m , К	θ_b	θ_g	$Se_{b,i}$	$\tau_1 / \tau_{1(1)}$, с/с	$\tau_2 / \tau_{2(1)}$, с/с	$\tau_{ind} / \tau_{ind(1)}$, с/с
200	448	862	0,73	-5,1	0,4	0,16/0,20	0,76/0,71	0,93/0,91
400	384	863	2,11	-4,69	0,262	0,39/0,44	3,44/3,04	3,83/3,48
1000	381	864	4,06	-4,01	0,158	2,31/1,35	21,48/19,62	23,79/20,97

тривалість цієї стадії визначається як:

$$\tau_2 = \frac{V_c c_c \rho_c}{S_c \lambda_g Le^m} \frac{d}{Sh} \ln \left(\left(1 - \frac{T_{b,i} + RT_{b,i}^2 / E}{T_m} \right) \cdot \frac{1}{\delta} \right), \quad (11)$$

У таблиці 1 і таблиці 2 наведено порівняння тривалості першої (8) та (11) другої стадій і часу каталітичного запалювання в цілому при зміні концентрації горючого газу та діаметра каталізатора, відповідно. Спостерігається задовільне узгодження. Таким чином, основною величиною, яку необхідно попередньо знайти, є температура запалювання. Якщо час другої стадії практично не залежить від неї, то час першої стадії визначається різницею початкової температури і температури запалювання. Як видно з (7) та (8), зі збільшенням різниці $T_b - T_{b,i}$, час першої стадії швидко зменшується.

Висновки

Таким чином, вперше запропоновано метод аналітичного пошуку періоду індукції до стійкої температури горіння холодних газових сумішей з домішками горючих речовин на частинках (нитках) металевих каталізаторів. Метод базується на попередньому знаходженні критичної температури

запалювання. Весь час затримки запалювання ділиться на дві стадії – розігріву частинки каталізатора в перехідній та дифузійній областях. Знайдені аналітичні вирази для тривалості кожної зі стадій, що дозволяють оцінити вплив концентрації домішки горючого газу та приведенного діаметра частинки (нитки) каталізатора на період індукції та температуру безполум'яного горіння газоповітряних сумішей. Здійснення запалювання каталітичної реакції на поверхні каталізатора в холодних газових сумішах шляхом попереднього підігрівання лише каталізатора є енергетично вигідним ніж постійне нагрівання газової суміші з метою реалізації каталітичного самозаймання.

Калінчак В.В. - доктор фізико-математичних наук, професор кафедри теплофізики;
Черненко О.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теплофізики;
Сікорський М.В. - магістр фізичного факультету;
Софронков О.Н. – професор, доктор технічних наук, академік Академії Наук Вищої Школи України, дійсний член Американської Академії Наук у Нью-Йорку;
Федоренко А.В. – аспірант.

- [1] В.Н. Пармон, А.Д. Симонов, В.А. Садьков, С.Ф. Тихов, Физика горения и взрыва 2, 5 (2015).
- [2] К.П. Латышенко, Технические измерения и приборы. В 2 т. Т. 2. (Юрайт, Москва, 2016).
- [3] Д.А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике (Наука, Москва, 1987).
- [4] V.V. Kalinchak, A.S. Chernenko and V.V. Kalugin, Journal of Engineering Physics and Thermophysics 88(3), 737 (2015).
- [5] В.В. Калінчак, О.С. Черненко, О.Н Софронков, А.В. Федоренко, Фізика і хімія твердого тіла 18(1), 52 (2017).
- [6] А.С. Черненко, А.А. Мойса, В.В. Калінчак, Молодежь в науке – 2009, прил. к журн. «Вести Национальной академии наук Беларуси», Серия физико-математических наук, серия физико-технических наук 5(5), 214 (2010).

V.V. Kalinchak¹, O.C. Chernenko¹, M.V. Sikorskyi¹, O.N Sofronkov²,
 A.V. Fedorenko¹

Cool Air-Gas Mixtures with Combustible Gas Admixtures Steady Flameless Combustion Delay Time on Platinum Particle (Wire)

¹Odessian National University named after II Mechnikova, st. Novorossiysk, 2, Odessa, Ukraine, 65000,
 e-mail: chernalex@ukr.net

²Odessa State Ecological University, st. Lviv, 15, Odessa, Ukraine, 65000, teplophys@onu.edu.ua

The proposed work shows analytical way to find a build-up time (induction period) for a mode of steady flameless catalytic combustion on metallic wire for cool air-gas mixtures with combustible gaseous admixtures using as an example flameless combustion of air-gas mixtures with hydrogen admixture of a platinum wire. Steady flameless combustion is observable after an induction period due to increase of initial catalyst temperature exceeding critical point of ignition which depends on particle diameter and combustible gaseous admixture content. Total time of build-up time is split into two stages, being the time of catalytic reaction proceeding in transient and diffusion stages, respectively. Effects of combustible gas ratio, catalyst wire diameter and excess of initial temperature compared with point of ignition upon particular stages duration and induction period are illustrated.

Keywords: metallic oxidation catalysts, platinum wire, hydrogen, induction period, ignition, self-ignition, fading, surface (flameless) combustion.