

ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК 536.4

Калінчак В.В.¹, Черненко О.С.², Дунаєвська Н.І.³, Бондзик Д.Л.⁴

^{1,3,4}Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

²Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-9123-2450>

² <https://orcid.org/0000-0002-3722-0694>

³ <https://orcid.org/0000-0003-3271-8204>

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3123-1971>

Аналітичне дослідження концентрацій кисню займання та погасання сухих залишків (коксів) частинок вугілля різного ізоморфізму

Зменшення запасів антрациту та розширення використання низькореакційних вугілля і біомаси в тепловій енергетиці зумовлюють необхідність детального аналізу умов займання, поруватих вуглецевих частинок, які обумовлені в першу чергу концентрацією кисню в залежності від температури і діаметра частинок ;в другу чергу – температурою і тиску окисника. У роботі досліджено вплив роду вугілля, діаметра, температури окисника на концентрації кисню займання та погасання поруватих частинок вугілля і біомаси різного ізоморфізму в газових сумішах, що містять кисень, за кімнатної температури. Основну увагу приділено частинкам, які складаються з вуглецевого залишку після виділення летких речовин.

Розроблено фізико-математичну модель теплової поведінки поруватої вуглецевої частинки з урахуванням тепловиділення внаслідок гетерогенних реакцій окислення, теплообміну з навколишнім газовим середовищем і стінками реактора, а також внутрішньої дифузії кисню та хімічного реагування в порах. У моделі враховано вплив ізоморфізму вугілля через зміну енергії активації, поруватості, питомої поверхні пор і густини частинок. Отримано аналітичні залежності для стаціонарних температур частинок та критичних умов займання і погасання.

Показано існування гістерезисної області параметрів, у межах якої займання поруватих частинок можливе шляхом короточасного підвищення їх початкової температури вище критичного значення. Перехід від антрациту до більш поруватого деревного вугілля приводить до зниження температур займання, мінімальної концентрації кисню та розширення діапазону розмірів частинок, здатних до займання в холодних газових сумішах. Доведено, що врахування реагування всередині пор є необхідним для коректного опису процесів займання і горіння поруватих вуглецевих матеріалів.

Ключові слова: вугілля, кисень, частинка, займання, погасання, гістерезис, реагування в порах.

Актуальність. Зменшення запасів антрациту для задач теплової енергетики змусило шукати можливості ефективного використання інших менш енергетичних типів вугілля. В той же час саме в котлах для отримання тепла зараз активно ведуться роботи по заміні частини вугілля на біомасу, яка переважно складається з сухих твердих органічних речовин, зазвичай у вигляді деревних пелет чи відходів сільського господарства [1, 2].

Вугілля має багато активних груп, які можуть взаємодіяти з киснем за кімнатної температури, що супроводжується значним виділенням тепла [3, 4].

Температура вугілля зростатиме, коли тепло не розсіюється достатньо, що називається самозайманням. Якщо самозаймання не буде виявлено та не вжито заходів вчасно, воно може легко перерости в тліюче або полум'яне горіння залежно від таких факторів, як концентрація кисню [5].

Вугілля перед спалюванням перетворюють в пил з 90% частинок менше 80 мкм, а іноді і 50 мкм [6]. Частинки сухого біопалива зазвичай складають менше 1 мм. Як і частинки вугілля, так і біопалива, містять значну частину летких речовин, які при порівняно невеликому нагріванні доволі легко відділяються від частинок і починають горіти нагріваючи оточуюче частинки газове середовище.

В такій задачі важливим є критичні умови, які потрібно організувати для самозаймання і подальшого горіння таких частинок, які складаються з вугільного залишку без летких речовин у складі. Важливим параметром є висока температура газової суміші, що містить окисник. Реалізація в цьому випадку займання пилу, зазвичай, потребує на початковому етапі суттєвого розігріву цієї суміші. Коксові частинки антрациту мають високі температури займання (близько 1200-1400 K) [7]. Вміст летких речовин зменшує її до 800 K[8]. На реалізацію високо-температурного режиму (горіння) таких частинок при ще менших температурах газової суміші (і при кімнатній температурі), практично не зверталася увага.

Відомо, що вугілля різного ізоморфізму, можна відрізнити в першу чергу енергією активації для основної реакції горіння вуглецю [7]. Так для антрацитів $E_1 = 130 - 146$ кДж/моль, для деревного вугілля $E_1 = 75-84$ кДж/моль. Така відмінність пояснюється не тільки різної морфологією вугілля, але і впливом поруватості. Так вплив внутрішнього реагування при значній поверхні пор призводить до зменшення ефективної енергії активації реакції в два рази.

З іншого боку менш енергетичне вугілля зменшує максимальні температури горіння пилового факелу. І тоді вплив послідовної реакції вуглецю з діоксидом вуглецю $C + CO_2 = 2CO$ (III) стає несуттєвим, а основними є паралельні хімічні реакції вуглецю з киснем $C + O_2 = CO_2$ (I), $2C + O_2 = 2CO$ (II).

Метою даної роботи є визначення критичних умов займання і погасання поруватих частинок вугілля різного ізоморфізму в газових сумішах кімнатної температури.

Об'єкти: електродне вугілля (Е), антрацит(А), кокс газового вугілля (Г), деревне вугілля (Д), які відрізняються густиною, енергією активації, питомою поверхнею пор та змістом золи.

Постановка задачі. Зміна середнього значення температури поруватої вуглецевої частинки визначається виділенням тепла в результаті протікання хімічних реакцій q_{ch} , теплообміном частинки з газом q_g і зовнішніми стінками q_w :

$$\frac{c_c \rho_c d}{6} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q_{eff}, \quad q_{eff} = q_{ch} - q_g - q_w, \quad T(t=0) = T_b, \quad (1)$$

$$q_{ch} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) (1 - X_a) \rho_{gs} Y_{O_2s},$$

де c_c, ρ_c – питома теплоємність і густина частинки; T_b – початкова температура частинки, Q_1, Q_2 – теплові ефекти хімічних реакцій (I) – (II), розраховані на одиницю маси O_2 . В результаті реакцій (I) – (II) відбувається в часі зменшення діаметра d в результаті реакцій на поверхні та густини поруватої частинки за рахунок реагування всередині пор:

$$(1 - X_a) \frac{\partial d}{\partial t} = - \frac{2M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{\rho_{gs}}{\rho} Y_{O_{2s}}, \quad d(t=0) = d_b, \quad (2)$$

$$(1 - X_a) \frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{6}{d} \cdot \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{k_1 + k_2} \rho_{gs} Y_{O_{2s}}, \quad \rho(t=0) = \rho_b, \quad (3)$$

$$k_v = \frac{2D_v}{d} (Se_v \text{cth} Se_v - 1), \quad Se_v = \sqrt{\frac{F_v d^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}}, \quad \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T} \frac{P}{P_0}, \quad k_1 = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),$$

$$k_2 = k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad k_{01,2} = k^* \exp\left[-\frac{E_{1,2}}{RT} \left(1 - \frac{T}{T^*}\right)\right], \quad E_2 = 1.1E_1,$$

де k_1, k_2 – константи хімічних реакцій (I) – (II), м/с; k_v – константа внутрішнього реагування, м/с; $Y_{O_{2s}}$ – відносна масова концентрація кисню на поверхні частинки; D_v – коефіцієнт внутрішньої дифузії кисню всередині пор, м²/с; F_v – питома поверхня пор, м⁻¹; Se_v – внутрішнє число Семенова, що визначає відносну роль хімічного реагування на поверхні пор до масопереносу кисню в порах; d_b, ρ_b – початкові діаметр і густина частинки; $T^* = 2600$ К, $k^* = 100$ м/с.

Розрахунки проводились при наступних параметрах: $Q_1 = 12.343$ МДж/кг O_2 , $Q_2 = 6.844$ МДж/кг O_2 [7].

Коефіцієнт внутрішньої дифузії кисню в порах, питома поверхня пор виражається через поруватість частинки і коефіцієнт дифузії горючої речовини в газовій фазі [7, 9]:

$$D_v = \chi^2 \cdot D_g, \quad F_v = \chi(1 - \chi) \cdot F_{v0}, \quad \chi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{real}},$$

де χ – поруватість частинки (відношення об'єму пор до об'єму цілої частинки); ρ_{real} – дійсна густина матеріалу частинки.

При природній конвекції критерій Нусельта визначається критерієм Грасфгофа [10]:

$$Nu = 2 + 0.42(Gr \cdot Pr)^{0.25}, \quad Gr = \frac{gd^3}{\nu_g^2} \cdot \frac{(T - T_g)}{T_0}.$$

При визначення критичної залежності для частинок діаметром 1-15 мм було вибрано характерне «середнє» значення числа Нусельта $Nu = 4.5$.

Запалювання в холодних сумішах. Для аналітичного дослідження характеристик запалювання частинок коксу в азотно-кисневих сумішах розглянута залежність концентрації кисню від стаціонарної температури (з умови $q_{eff} = 0$ рівняння (1)):

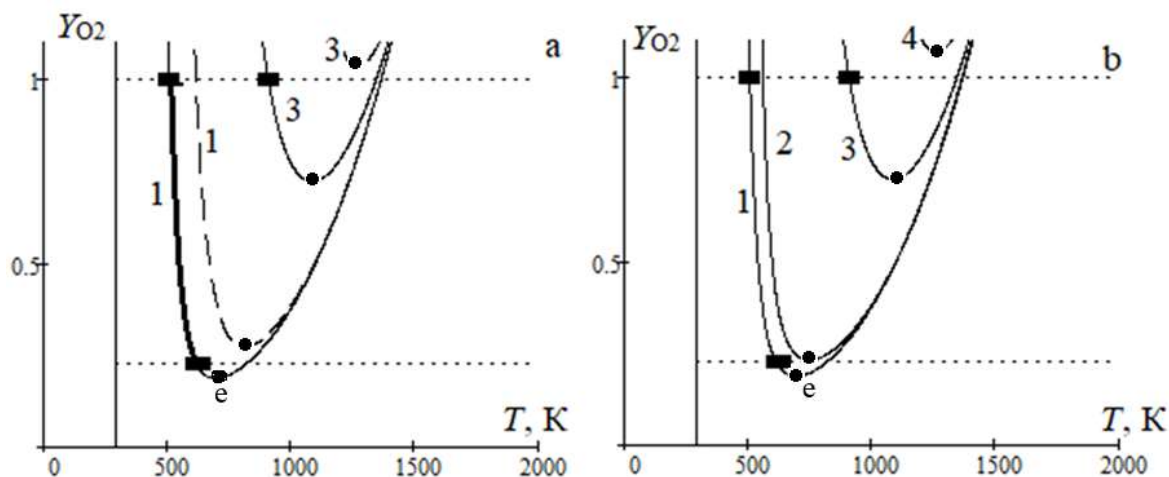


Рис. 1. Вплив роду вугілля на залежність концентрації кисню від стаціонарної температури частинки. Діаметром 13 мм в газовій суміші кімнатної температури ($T_g = 293$ К). ■ – експеримент [11]. а) 1 – Д, 3 – А. Суцільна – врахування реагування в порах, пунктир – без реагування в порах. б) 1 – Д, 2 – Г, 3 – А, 4 – Е.

$$Y_{O_2} = \frac{c_{pg} \rho_g \frac{D_g Sh}{d} (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{(Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) (1 - X_a) \rho_{gs}} \left(1 + \frac{k_1 + k_2}{D_g Sh} \frac{\rho_{gs}}{\rho_g} \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) d\right). \quad (4)$$

В попередніх дослідженнях [11, 12] проводилися експериментальні дослідження запалювання і горіння великих частинок вугілля в холодних азотно-кисневих сумішах. Об'єктами дослідження були взяті частки деревного вугілля і антрациту з діаметром від 7 до 15 мм. В таких сумішах спостерігається критичне значення початкової температури, при перевищенні якої спостерігається самовільне зростання температури і досягнення квазістійкого режиму горіння. В повітрі для частинок деревного вугілля критичне значення початкової температури лежить в межах 600-650 К, в кисні – 525-555 К, для антрациту тільки в кисні – 895-925 К. З частинками електродного вугілля запалювання в кисні не вдалося реалізувати.

Зольний шар на деревному вугіллі слабкий, неміцний: руйнується при слабкому обдуванні, тому її вплив для рухомої частинки незначний.

На рис. 1 представлені стаціонарні залежності (4) в газових сумішах кімнатної температури. Для частинки деревного вугілля і в повітрі, і в кисні (рис. 1а, крива 1, жирна лінія) є температура запалювання-критичне значення початкової температури, більше якої відбувається перехід на стійку гілку температури горіння. Так, для ряду концентрацій кисню існує три стаціонарні температури, які відповідають низькотемпературному окисленню, температурі запалювання і горінню. Для частинки антрациту горіння можливе лише для високих концентрацій кисню.

На рис. 1а представлено порівняння залежностей (4) з врахуванням додаткового реагування в порах і без нього. Існує думка, що велика поруватість

Таблиця 1. Прийняті властивості для коксів вугілля

Вид коксу вугілля	Густина, кг/м ³	Енергія активації E_1 , кДж/моль	Питома поверхня пор F_{v0} , м ² /м ³	Зольність X_a
Електродне (Е)	1600	155	$2.5 \cdot 10^5$	0
Антрацит (А)	1550	140	$5.0 \cdot 10^5$	0.01
Газове (Г)	800	100	$2.5 \cdot 10^5$	0.08
Деревне (Д)	450	70	$5.5 \cdot 10^4$	0.05

призводить до зменшення видимої енергії активації в два рази в порівнянні з електродним вугіллям. Наприклад енергія активації деревного вугілля: 70 і 155 кДж/моль. Тому, начебто, взявши меншу енергію активації, враховувати додатково реагування в порах не потрібно.

Однак, як видно з порівняння дослідних даних по запалюванні великих частинок деревного вугілля і антрациту (рис. 1а), враховувати реагування в порах необхідно. Воно (наприклад для деревного вугілля) суттєво зменшує температури запалювання і допомагає це зробити в повітрі кімнатної температури.

Для коксів вугілля, вказаних в табл. 1, відмінність проявляється по енергії активації реакції (I) і густині коксу. Густина впливає на реагування всередині пор через питому поверхню пор і поруватість. Так (рис. 1b), при зміні ізоморфізму вугілля (від малопоруватого антрациту з високою енергією активації до високопоруватого деревного вугілля з низькою енергією активації) відбувається зниження температур запалювання і мінімальної концентрації кисню в суміші, при якій можливе запалювання великих частинок коксу.

На відміну від температур запалювання частинки узгодження температур горіння спостерігається лише в разі горіння частинки деревного вугілля в холодному повітрі. Це пояснюється відсутністю при низьких температурах (нижче 1000 К) гомогенного горіння чадного газу поблизу поверхні частинки, що спостерігається візуально у вигляді яскравої хмари біля поверхні частинки. Ця реакція погіршує дифузію кисню і, отже, зменшує його поверхневу концентрацію. Тому реальні температури горіння частинок будуть менше, ніж розраховані за формулою (4).

На рис. 2 представлені стаціонарні залежності (4) для різних діаметрів частинок коксу деревного вугілля і температури оточуючої газової суміші.

Так зі зменшенням діаметру частинки її температура запалювання збільшується. Це обумовлено в першу чергу збільшенням тепловіддачі з одиниці поверхні частинки. Нижня межа запалювання по концентрації кисню $Y_{O_{2e}}$ в межах від 1 до 15 мм практично не залежить від діаметру частинки.

Зі зростанням температури газового середовища можливості для реалізації горіння якісно змінюються. Так при температурах $T_g > 520$ К можлива реалізація самозаймання: $Y_{O_{2i}} < 1$ [13].

На стаціонарній залежності $Y_{O_2}(T)$ максимум (рис.2b) визначає критичну умову самозаймання (точка і), а мінімум – критичну умову погасання (точка е) частинки коксу. В режимі низькотемпературного окислення температура части

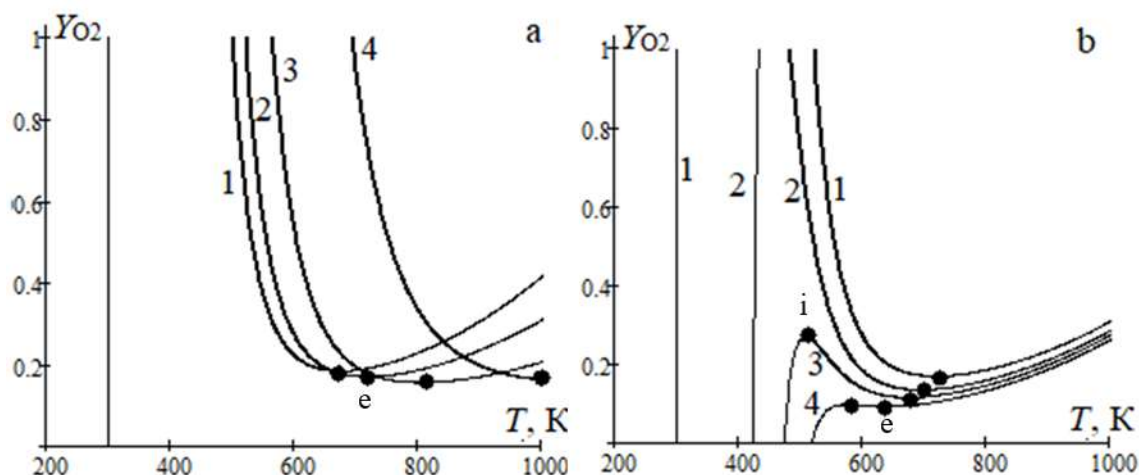


Рис. 2. Залежність концентрації кисню від стаціонарної температури частинки. Кокс деревного вугілля в газовій суміші кімнатної температури ($T_g = 293$ K).

а) вплив діаметру частинки d : 1 – 15 мм, 2 – 10 мм, 3 – 5 мм, 4 – 1 мм. ($T_g = 293$ K, $T_w = 293$ K). б) вплив температури газової суміші T_g ($T_w = 293$ K, $d = 10$ мм): 1 – 293 K, 2 – 500 K, 3 – 600 K, 4 – 700 K. Діаметр частинки 10 мм. Насичена товста лінія – залежність критичного значення концентрації кисню від початкової температури.

нки повільно зростає з ростом концентрації кисню в газі. При досягненні T_i відбувається стрибкоподібний перехід на стійкий режим горіння частинки. Температура горіння також зростає при збільшенні Y_{O_2} . Навпаки, при зменшенні Y_{O_2} температура горіння зменшується і при досягненні критичних значень $Y_{O_{2e}}$ і T_e відбувається погасання поверхневих хімічних реакцій. Крива, що лежить між точками **i** та **e**, визначає температури запалювання частинок. Це – гістерезисна область займання.

Критичні умови погасання. Критичні умови займання (точки **i**) та погасання (точки **e**) можна аналітично визначити [7, 15], застосовуючи умову екстремуму $\partial Y_{O_2} / \partial T = 0$ до стаціонарної залежності (4). Однак врахування реагування всередині пор ускладнює аналітичні розрахунки. Тому застосуємо деякі спрощення окремо для умов займання та окремо для умов погасання, окрім припущення незмінності теплофізичних властивостей при диференціюванні.

В точках погасання (точки **e**) температури більші за температуру нагрітої газової суміші відбувається зміщення кінетики хімічної реакції у внутрішню дифузійну **область**, в якій виконуються умови $Se_v \gg 1$. Константа внутрішнього реагування в цьому випадку не залежить від діаметру частинки: $k_v \approx \sqrt{(k_1 + k_2) D_v F_v}$, а тільки від температури.

Температурною залежністю множника $A_v = 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}$ знехтуємо: при харак-

терних температурах погасання вона є слабкою температурною залежністю.

Спершу визначимо температурні похідні:

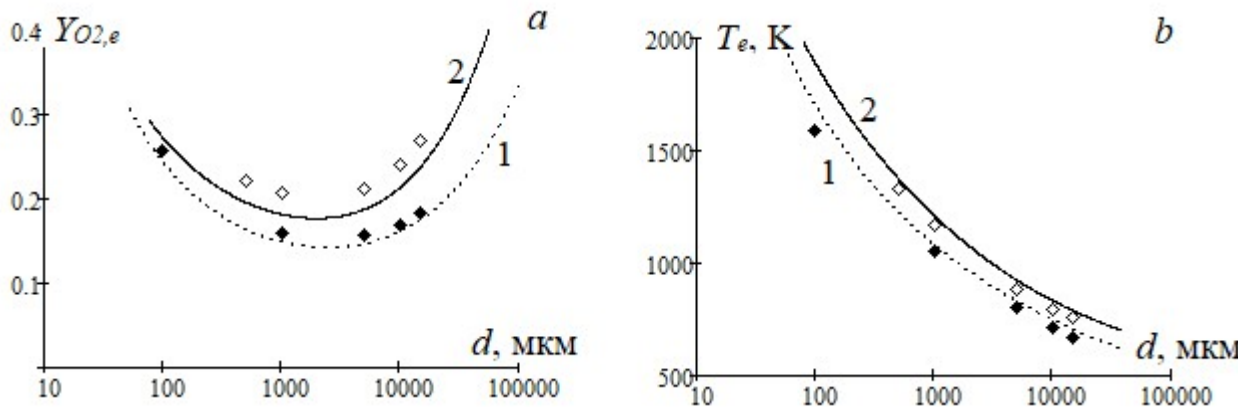


Рис 3. Залежність критичної концентрації кисню та температури погасання від діаметру частинки деревного вугілля в повітрі кімнатної температури ($T_g = T_w = 293\text{K}$): 1 – Д, 2 – Г. ♦, ◇ – значення зі стаціонарної залежності (5).

$$(k_1 + k_2)'_T = \frac{1}{RT^2}(k_1 E_1 + k_2 E_2) = \frac{E_{eff1}}{RT^2}(k_1 + k_2),$$

$$(Q_{f1}k_1 + Q_{f2}k_2)'_T = \frac{1}{RT^2}(Q_{f1}k_1 E_1 + Q_{f2}k_2 E_2) = \frac{E_{eff2}}{RT^2}(Q_{f1}k_1 + Q_{f2}k_2),$$

$$E_{eff1} = \frac{k_1 E_1 + k_2 E_2}{k_1 + k_2}, E_{eff2} = \frac{Q_{f1}k_1 E_1 + Q_{f2}k_2 E_2}{Q_{f1}k_1 + Q_{f2}k_2}, E_{eff2} < E_{eff1}.$$

Після застосування умови екстремуму $\partial Y_{O_2} / \partial T|_e = 0$ методом описаним в [7, 14, 15] отримуємо розв'язок у вигляді:

$$\bar{\beta}|_e = \frac{B + \sqrt{B^2 + (A_g - 1)(A'_w - (1 - \bar{E})A_w) / A_v}}{A_g - 1}, \quad 2B = \left(1 + \frac{A'_w}{A_v} - \frac{A_w}{A_v} - (1 - \bar{E})A_g\right).$$

Тут використані безрозмірні величини:

$$\bar{\beta} = \frac{\beta}{k_1 + k_2}, \quad A'_w = \frac{4\varepsilon\sigma T^3}{(k_1 + k_2)\rho_g c_g Le^{-1+m}}, \quad A_g = \frac{(T - T_g)}{RT^2 / E_{2eff}}, \quad \bar{E} = \frac{E_{1eff}}{E_{2eff}} > 1,$$

$$A_w = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)}{(k_1 + k_2)\rho_g c_g Le^{-1+m} RT^2 / E_{2eff}}.$$

В параметричному виді вираз для діаметрів частинки і концентрації кисню, які відповідають погасанню, представимо у вигляді системи (параметр– температура частинки T):

$$\begin{cases} Y_{O_2}|_e = \frac{c_g RT^2}{E_{eff2} Q_{eff} Le^{1-m} A_v} \left(\frac{1}{\bar{\beta}|_e} + 1 \right) (A_g \bar{\beta}|_e + A_w), \\ d|_e = \frac{D_g Sh}{k_1 + k_2} \cdot \frac{A_g - 1}{A_v} \cdot \frac{1}{\left(B + \sqrt{B^2 + (A_g - 1)(A'_w - (1 - \bar{E})A_w) / A_v} \right)}, \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 3а представлена залежність критичного значення концентрації кисню погасання від розміру частинки коксу. При параметрах системи, що лежать вище кривої спостерігається гістерезисний режим: частинка може перейти на високотемпературний режим окислення шляхом збільшення її початкової температури вище за температуру запалювання. При параметрах системи, що лежать нижче вказаної критичної кривої високотемпературний режим не досягається.

На даній залежності спостерігається мінімум. Він обумовлений зменшенням масопереносу кисню до одиниці поверхні частинки (i , отже, хімічного тепловиділення) з одночасним збільшенням тепловіддачі випромінюванням з ростом її діаметра. Адже реакції на поверхні частинки при температурах погасання лімітуються не тільки кінетикою, а ще масопереносом. При великих діаметрах частинки разом зі збільшенням відносної ролі теплообміну випромінюванням в загальних тепловтратах також зменшується і швидкість масопереносу кисню до одиниці поверхні частинки i , отже, хімічне тепловиділення. Таким чином, для вимушеного переходу на високотемпературний режим окислення необхідно окрім підвищення початкової температури потрібно підвищити концентрацію кисню.

Покращення якості вугілля призводить до підвищення критичних концентрацій погасання для всього діапазону розміру частинок вугілля. Як видно, в повітрі займання можливе для частинок деревного вугілля діаметром від 0.2 до 30 мм, а для коксу газового вугілля 0.3 – 9 мм.

Висновки. У роботі досліджено умови займання та погасання поруватих вуглецевих частинок різного ізоморфізму в газових сумішах, що містять кисень, за температур, близьких до кімнатних. Показано, що зі зміною ізоморфізму вугілля – від малопоруватого антрациту до високопоруватого деревного вугілля – суттєво змінюється характер теплового балансу та кінетики окислення частинок.

Встановлено існування гістерезисної області параметрів системи, в якій можливий перехід частинок у режим високотемпературного горіння за рахунок короткочасного підвищення їх початкової температури вище критичного значення. При цьому зі зростанням поруватості та зменшенням ефективної енергії активації розширюється як область концентрацій кисню, так і діапазон діаметрів частинок, для яких такий перехід є можливим.

Отримано стаціонарні аналітичні залежності, що пов'язують концентрацію кисню, розмір частинки та її температуру, і які дозволяють визначати критичні умови займання та погасання. Показано, що принципово важливим є врахування внутрішнього реагування в порах, яке відбувається в внутрішньо-дифузійній області та істотно знижує температури займання порівняно з моделями, що враховують лише поверхневі реакції.

Продемонстровано, що врахування лише зменшення енергії активації при переході до більш поруватих структур є недостатнім. Для адекватного опису процесів займання необхідно одночасно враховувати зміну густини, питомої поверхні пор і масопереносу кисню всередині частинки. Саме сукупність цих факторів визначає зсув критичних температур і концентрацій кисню.

Показано, що в повітрі кімнатної температури займання можливе для широкого класу поруватих вуглецевих частинок, зокрема деревного вугілля та коксу газового вугілля, у певному діапазоні розмірів, тоді як для антрациту такі режими реалізуються лише за значно жорсткіших умов. Отримані результати узгоджуються з наявними експериментальними даними та пояснюють спостережувані відмінності в поведінці частинок різного походження.

Отримані залежності можуть бути використані для оцінювання умов займання і стабільності горіння твердопаливних частинок у процесах спільного спалювання вугілля та біомаси, а також для аналізу пожежо- та вибухонебезпечності систем з поруватими вуглецевими матеріалами.

Література:

1. Дунаєвська Н.І., Бондзик Д.Л., Нехамін М.М., Мірошніченко Є.С., Безценний І.В., Євтухов В.Я., Щудло Т.С. Технологія спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в пиловугільних котлах ТЕС і ТЕЦ // *Naukainnov.* 2020. Т. 16, № 5. С. 86-96. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>
2. Syrodoy S.V., Kostoreva J.A., Kostoreva A.A., Asadullina L.I. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces // *Journal of the Energy Institute.* Volume 93, Issue 2, April 2020, Pages 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.07.007>
3. Tang, Y., and H. Wang Experimental investigation on microstructure evolution and spontaneous combustion properties of secondary oxidation of lignite// *Process. Saf. Environ.* 2019. Vol. 124:143–50. doi:10.1016/j.psep.2019.01.031.
4. Wei Lu, Baolong Guo, Guansheng Qi & Wenyu Yang Thermal Decomposition Model and Its Reaction Kinetic Parameters for Coal Smoldering with the Use of TG Tests in Oxygen-depleted Air // *Combustion Science and Technology.* 2019. 193(7):1-19. DOI: 10.1080/00102202.2019.1684910
5. Song, Z., H. Fan, J. Jiang, and C. Li. Insight into effects of pore diffusion on smoldering kinetics of coal using a 4-step chemical reaction model. // *J. Loss. Prevent. Proc.* 2017. 48:312–19. doi:10.1016/j.jlp.2017.04.020.
6. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverized coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment/ C. H. Medina, B. MacCoitir, H. Sattar, D. J.F. Slatter, H. N. Phylaktou, G. E. Andrews, B. M. Gibbs // *Fuel.* Volume 151, 1 July 2015, Pages 91-101 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.009>
7. Калинчак В.В. Черненко А.С. Теплофизика горения пылеугольного топлива (монография). – Одеса. ОНУ им. И. И. Мечникова. – 2017. – 225 с. <https://dspace.onu.edu.ua/handle/123456789/24761>
8. Glushkov D. O., Sharypov O. V. Ignition of a coal particle at the low temperature of gas flow // *The European Physical Journal Conferences.* 2015. Vol. 82:01045. DOI: 10.1051/epjconf/20158201045.
9. Головина Е.С.Высокотемпературное горение и газификация углерода. М.: Энергоиздат. – 1983. – 173 с.
10. Учебное пособие для вузов. – Под ред. В. В. Померанцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с
11. Kalinchak, V.V., Chernenko, A.S. Effect of Gas Mixture Pressure on the Ignition, Combustion, and Spontaneous Extinction of Chars of Coals of Different Polymorphisms //

- Combustion, Explosion and Shock Waves, 2021, 57(2), P. 215–221
<https://doi.org/10.1134/S0010508221020106>
12. Черненко А. С., Корчагина М. Н., Калинин В. В. Зажигание и горение частиц древесного угля в азотно-кислородных смесях комнатной температуры. Часть II. Аналитическое обоснование // Физика аеродисперсных систем. – 2018. – № 55. – С. 45-53. DOI: <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2018.55.141390>
 13. Kalinchak, V. V.; Chernenko, A. S.; Sofronkov A.N., Fedorenko A.V. Ignition and Self-Supporting Burning of Gas-Air Mixtures with Hydrogen Admixtures on Platinum Wire // Physics and chemistry of solid state. – 2017. – T.18, Vol.4. – P. 449-454. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.18.4.454>
 14. Kalugin V.V., Kalinchak V.V and Chernenko A.S. High-temperature ammonia oxidation over a platinum catalyst under conditions of the parallel formation of nitrogen-containing products // Kinetics and Catalysis. – 2015. – Vol. 56, №.3. – pp. 335–342. DOI: 10.1134/S0023158415030106
 15. Калинин В.В. Черненко О.С. Теплофизика безполум'яного горіння газів (монографія). – Одеса. ОНУ ім. І. І. Мечникова. – 2020. – 198 с. <https://dspace.onu.edu.ua/handle/123456789/28625>

Kalinchak V.V., Chernenko O.S., Dunaievska N.I., Bondzyk D.L.

Analytical study of the oxygen concentrations for ignition and extinction of dry residues (cokes) of coal particles with different isomorphism

SUMMARY

The depletion of anthracite reserves and the increasing use of low-reactivity coals and biomass in thermal power generation necessitate a detailed analysis of the ignition conditions of porous carbon particles. These conditions are determined primarily by the oxygen concentration as a function of temperature and particle diameter, and secondarily by the temperature and pressure of the oxidizing medium. This work investigates the influence of coal type, particle diameter, and oxidizer temperature on the oxygen concentrations required for ignition and extinction of porous coal and biomass particles of different isomorphism in oxygen-containing gas mixtures at room temperature. The main attention is focused on particles consisting of a carbon residue remaining after the release of volatile substances.

A physico-mathematical model of the thermal behavior of a porous carbon particle is developed, taking into account heat release due to heterogeneous oxidation reactions, heat exchange with the surrounding gas and reactor walls, as well as internal diffusion of oxygen and chemical reaction within the pores. The model incorporates the effect of coal isomorphism through variation of activation energy, porosity, specific pore surface area, and particle density. Analytical expressions are obtained for the steady-state particle temperatures and for the critical ignition and extinction conditions.

It is shown that a hysteresis region of parameters exists, within which the ignition of porous particles becomes possible by briefly increasing their initial temperature above a critical value. The transition from anthracite to more porous charcoal leads to a decrease in ignition temperature, a reduction in the minimum oxygen concentration required, and an expansion of the range of particle sizes capable of igniting in cold gas mixtures. It is demonstrated that considering reactions within the pores is essential for an accurate description of ignition and combustion processes in porous carbon materials.

Keywords: coal, oxygen, particle, ignition, extinction, hysteresis, pore-scale reaction.