

DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.09

УДК 669.162.22+267.4.

Ю.О. Ступак, Т.С. Хохлова

ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІННЯ ПИЛОПОДІБНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ТА ВПЛИВ ОКРЕМИХ ЙОГО ВЛАСТИВОСТЕЙ НА ХАРАКТЕР ПРОТІКАННЯ ПОЧАТКОВИХ СТАДІЙ ГОРІННЯ

Анотація. У статті розглянуто окремі методологічні підходи до моделювання горіння пилоподібного палива в лабораторних умовах, що сформувалися за останні десятиліття та окремі результати досліджень горіння поодиноких часток за допомогою високошвидкісної фото- та відеофіксації. Показано, що на сьогодні сформовані чіткі уявлення щодо процесу горіння як поодиноких паливних часток, так і горіння їх у факелі. Зазначено, що для деяких видів палива поділ процесу горіння часток на стадії є вельми умовним, оскільки через природу (походження) паливної сировини окремі стадії можуть накладатися одна на одну або взагалі бути відсутні. Висунуто тезу про те, що незалежно від критеріїв ефективності використання палива для розробки найбільш ефективних технологій його спалювання слід враховувати не тільки специфіку (умови) тих чи інших агрегатів та процесів, але й природу (походження) паливної сировини, що використовується, оскільки вона безпосередньо визначає фізико-хімію процесу горіння. Авторами експериментально підтверджено тісний зв'язок між температурою займання палива та виходом з нього летких речовин, зокрема з'ясовано, що температура займання палива функціонально залежить від вмісту СО в летких речовинах, вихід якого з палива може бути одним з важливих критеріїв при оцінці його горючості (займистості). Висунуто тезу про доцільність використання параметру «температура займання» як такого, який слід враховувати (а в окремих випадках – визначати), оскільки він тісно пов'язаний як з часом до займання часток палива, так і з повнотою його згорання на початкових стадіях, що було доведено експериментальним шляхом.

Ключові слова: пиловугільне та пилоподібне паливо, стадії горіння, поодинокі паливні частки, біопаливо, вихід летких речовин, температура займання, повнота згорання.

© Ступак Ю.О., Хохлова Т.С., 2024

1. Постановка задачі

Не зважаючи на сучасні тенденції щодо скорочення використання викопного палива задля зменшення викидів т.з. парникових газів, завдання організації максимально ефективного використання твердого палива залишається вельми актуальним на найближчі десятиліття. Принаймні в чорній металургії, а саме – виробництві сплавів на основі заліза з використанням доменних печей, де в якості заміника коксу вже достатньо давно використовують пиловугільне паливо (ПВП) на основі вугілля з марок, які не придатні для виготовлення коксу.

В останні десятиліття було запропоновано чимало способів та видів палива для виготовлення ПВП, серед яких – додавання до вугільного пилу легкозаймистих видів твердого палива, таких як буре вугілля, торф, лігнін тощо. В якості додатків можуть також використовуватися тверді відходи побутового, сільськогосподарського та промислового походження, які можуть бути достатньо ефективно утилізовані в різних енергетичних та металургійних процесах. Окрім певної кількості тепла, що можна отримати при спалюванні відходів, вони можуть бути твердими та/або газоподібними відновлювачами, замінюючи традиційні, більш дорогі компоненти металургійної шихти аналогічного призначення.

Як показала практика, спалювання великих обсягів палива за короткий проміжок часу з максимально можливими швидкістю та ефективністю (повнотою згорання) є найбільш ефективним в разі використання пилоподібного стану палива, з оптимальною крупністю окремих частинок. Для традиційних видів вугілля різних марок, торфу та ін. закономірності горіння як окремих часток, так і у факелі, досліджені в останні десятиліття більш-менш широко і детально. Але ж для відходів різного походження, особливо тих, що тільки відносно недавно привернули до себе увагу дослідників (деревна тріска або тирса, папір і картон; сільськогосподарські відходи, такі як солома, рисове лушпиння, шкаралупа горіхів, кісточка винограду, оливок тощо; шлам з паперових фабрик та інших джерел, а також енергетичні культури, спеціально вирощені для використання в якості біопалива), окремі аспекти щодо їх ефективного використання потребують уточнення.

На сьогодні випробувано та успішно застосовано багато методик дослідження горіння пилоподібного палива, в т.ч. паливних сумішей різних типів. Враховуючи чисельні результати, що отримані, можна констатувати, що вирішальне значення має організація спалювання палива, з урахуванням певних, не завжди очевидних характеристик, пов'язаних з природою або походженням паливної сировини. Виходячи з цього, вбачається доцільним виділити найбільш придатні методи і підходи для досліджень сучасних паливних матеріалів на основі вугілля, відходів, що були названі та їх сумішей, а також дослідження найбільш важливих особливостей того чи іншого палива, що повинні враховуватися для максимально ефективного його використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні уявлення про природу та закономірності горіння газів і твердого палива сформувалися на базі теоретичних та експериментальних досліджень Н.Н. Семенова, Я.В. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецького, А.С. Предводителя, С.Д. Яворського та інших вчених. У світлі сучасних уявлень основою процесу горіння палива та сполук, що містять вуглець, є хімічні реакції горючих елементів із киснем. У топкових і подібних їм за умовами горіння палива агрегатах ці реакції протікають у потоці й умовах накладення низки фізичних факторів на основні хімічні процеси та перетворення. Одночасний вплив великої кількості факторів, що суттєво впливають, зумовлює складність теоретичних та експериментальних досліджень, через що практично всіма дослідниками приймаються ті чи інші спрощення та припущення. Не зважаючи на те, що названі спрощення часто вносять помітні спотворення в результати експериментів і є причиною певної невідповідності отриманих в лабораторних умовах результатів практиці, окремі методики дослідження горіння, запроваджені ще в середині ХХ століття, використовуються дослідниками і донині.

Серед методик дослідження горіння твердого палива у факелі слід зазначити індуктивний метод наукового дослідження, за яким вивчають не горіння факела в цілому, але горіння окремо взятих частинок палива, з подальшим використанням (із певними застереженнями) отриманих

результатів для уточнення закономірностей горіння факела в цілому та пошуку способів покращення тих чи інших параметрів процесу. Одним з перших вказаний метод був запропонований у колишньому ВТІ В.І. Бабієм із співробітниками [1]. Отримані чисельні результати цих досліджень були пізніше узагальнені в декількох монографіях. На спеціально створеній лабораторній установці за результатами спостережень (швидкісна кінозйомка) за одиночними частинками, що горять, були отримані дані щодо абсолютної і відносної тривалості різних стадій займання і вигорання частинок вугільного пилу, вивчений характер зміни температури і розміру частинок вугільного пилу в процесі їх вигорання. Вивчено вигорання порошинок при істотно знижених концентраціях кисню, що мають місце на заключних стадіях процесу горіння практично в усіх технологіях зі спалюванням ПВП у факелі.

За результатами досліджень названих авторів, процес горіння частки вугілля може бути умовно розділений на чотири стадії, тривалість яких із задовільною точністю можна характеризувати наступними рівняннями [2]:

1. Прогрів частки до займання летких речовин:

$$\tau_{з.л.} = k_{з.л.} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_{г.}^{-4} \cdot \delta^{0,8}, \quad (1)$$

де $\tau_{з.л.}$ – тривалість прогріву частки до займання летких речовин, с; $T_{г.}$ – температура оточуючого середовища (газу), К; δ – середній початковий розмір частки, м; $k_{з.л.}$ – відносний коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом для вугілля кожної марки.

2. Горіння летких речовин:

$$\tau_{г.л.} = k_{г.л.} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot T_{г.}^{-4} \cdot \delta^2, \quad (2)$$

де δ – вихідний розмір частки, м; $k_{г.л.}$ – дослідний коефіцієнт, характерний для кожної марки вугілля.

3. Прогрів коксового залишку [3]:

$$\tau_{п.к.} = 5,36 \cdot 10^4 \cdot T_{г.}^{-1,2} \cdot \delta^{1,5}. \quad (3)$$

4. Вигорання коксового залишку:

$$\tau_{г.к.} = k_{г.к.} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A_{к.}^c}{100} \cdot \frac{\rho_s \cdot \delta^2}{T_{г.}^{0,9} \cdot O_2}, \quad (4)$$

де $\tau_{г.к.}$ – тривалість горіння коксового залишку, с; K ; $k_{г.к.}$ – дослідний коефіцієнт, що характеризує специфіку вигорання часток вугілля певної марки; A_k^c – внутрішня зольність коксового залишку, %; O_2 – об’ємна концентрація кисню, %; ρ_3 – густина коксового залишку, що здається, $кг/м^3$.

Стадії горіння окремої частки твердого палива, яким відповідають рівняння 1-4, доволі показово ілюструє рис. 1, на якому наведені дані одного з подібних досліджень.

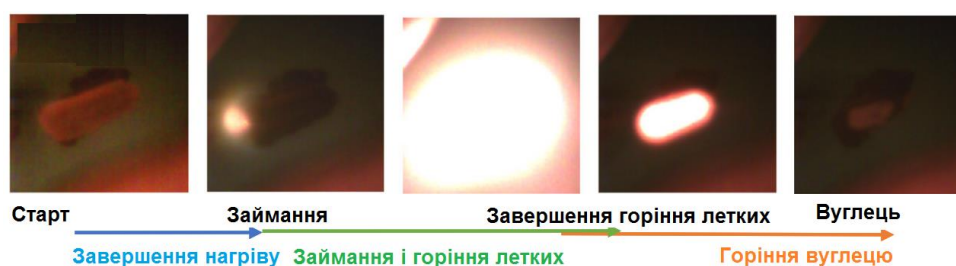


Рисунок 1 - Послідовні етапи спалювання частинок зразку біомаси [4]

Доволі інформативною є емпірична залежність для сумарної тривалості до займання коксового залишку ($\tau_{з.к.} = \tau_{з.л.} + \tau_{г.л.} + \tau_{п.к.}$):

$$\tau_{з.к.} = 1,12 \cdot 10^{10} \cdot k_{з.к.} \cdot \frac{\rho_3 \cdot \delta^{1,2}}{T_c^3} \left(\frac{21}{O_2} \right)^n, \quad (5)$$

де ρ_3 – густина вугілля у повітряно-сухому стані, $кг/м^3$; δ – розмір частки вугілля, м; $k_{з.к.}$ – дослідний коефіцієнт; $n = 0,15$ – для антрацитового пилу, $n = 0,25-0,5$ – для кам’яного та бурого вугілля.

Подібні емпіричні залежності були отримані в експериментах й інших дослідників, наприклад тих, що наведені в монографії [5].

Чисельні сучасні дослідження [6, 7 та ін.] в основному лише уточнюють отримані в минулі десятиліття дані, однак з використанням найсучаснішого наукового обладнання й розрахункових методик. Хоча результати окремих сучасних досліджень горіння поодиноких пилоподібних часток палива варто порівняти із вже згаданими [1-3, 5].

Так, у аналітичному огляді від Є. Марек (Ewa Marek) та Кж. Станьчик (Krzysztof Stańczyk) узагальнено широкий спектр методик, які були створені у нещодавній історії досліджень горіння окремих частинок вугілля та мотивовані необхідністю розвитку знань для нових, чистих технологій вугілля. Авторами

зазначається, що в більшості досліджень останніх років спалювання вугілля зазвичай зводиться до характеристики явища займання частинок та підетапів спалювання частинок, але через різні недоліки методологій результати досліджень дещо відрізняються і не завжди узгоджуються навіть при описі однієї й тієї ж досліджуваної проблеми [8]. На підтвердження цієї тези можна навести порівняльні результати спалювання частинок вугілля в різних газових атмосферах із зазначенням механізмів згоряння (двоступеневе спалювання: гомогенне та гетерогенне, одностадійне спалювання: гетерогенне або без запалення), отримані авторами R. Khatami, C. Stivers, K. Joshi та ін., що показані на рис. 2.

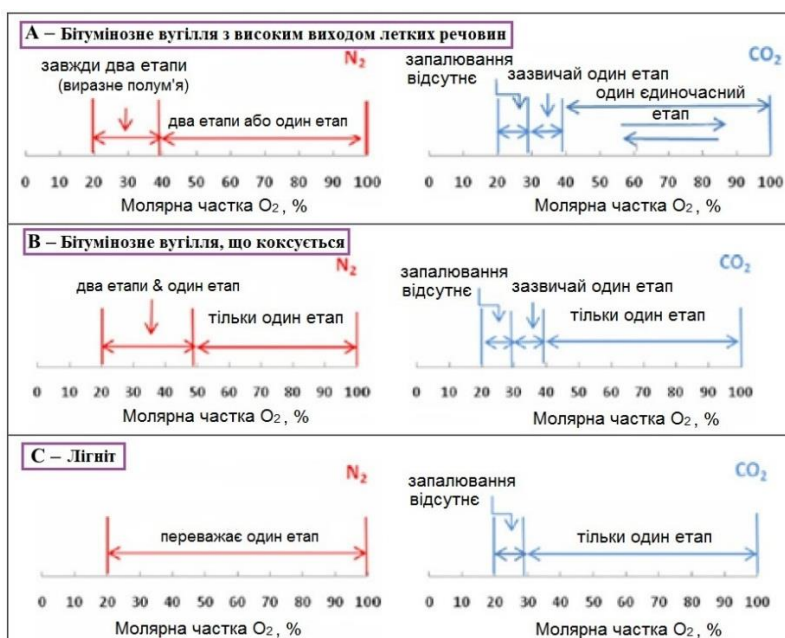
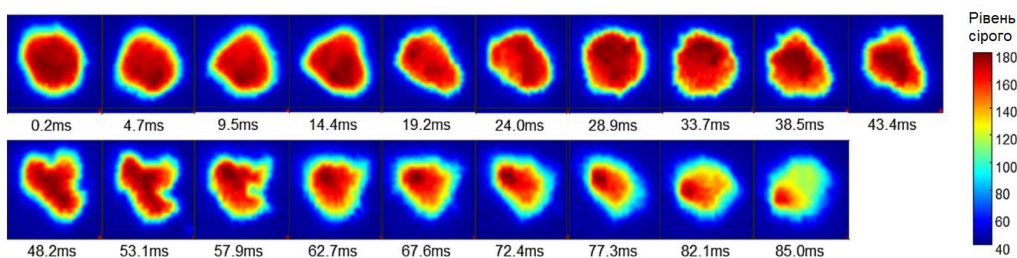


Рисунок 2 - Порівняння результатів спалювання частинок вугілля в різних газових атмосферах із зазначенням механізмів згоряння [9]

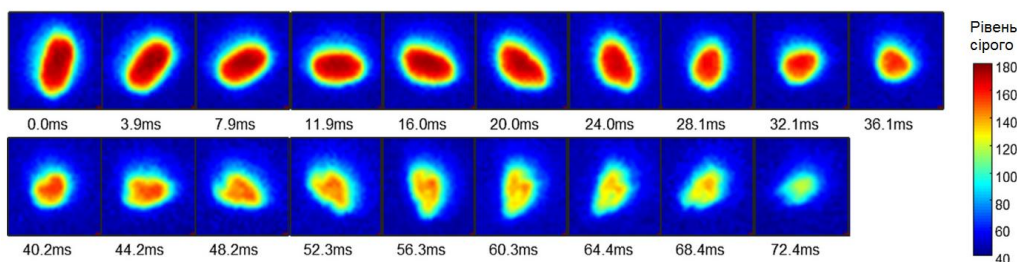
Наведені на рис. 2 дані дещо відрізняються від концепції та відповідних результатів, наведених раніше (формули 1-4), але ж певною мірою їх уточнюють щодо ролі кисню у процесі займання частинок в різних газових середовищах.

Доволі показовими та деякою мірою інформативними є дані фото- та відеофіксації займання та вигорання поодиноких часток палива, які отримані у багатьох дослідженнях останніх років. Так, цікавими, в т.ч. з наукової точки

зору, є результати досліджень вигорання поодиноких часток вугілля та біомаси, що показані на рис. 3 та 4 [10, 11].



(a) Частка А (150-212 μm).



(b) Частка В (106-150 μm).

Рисунок 3 - Псевдоколірні зображення інтенсивності світла частинок [10]

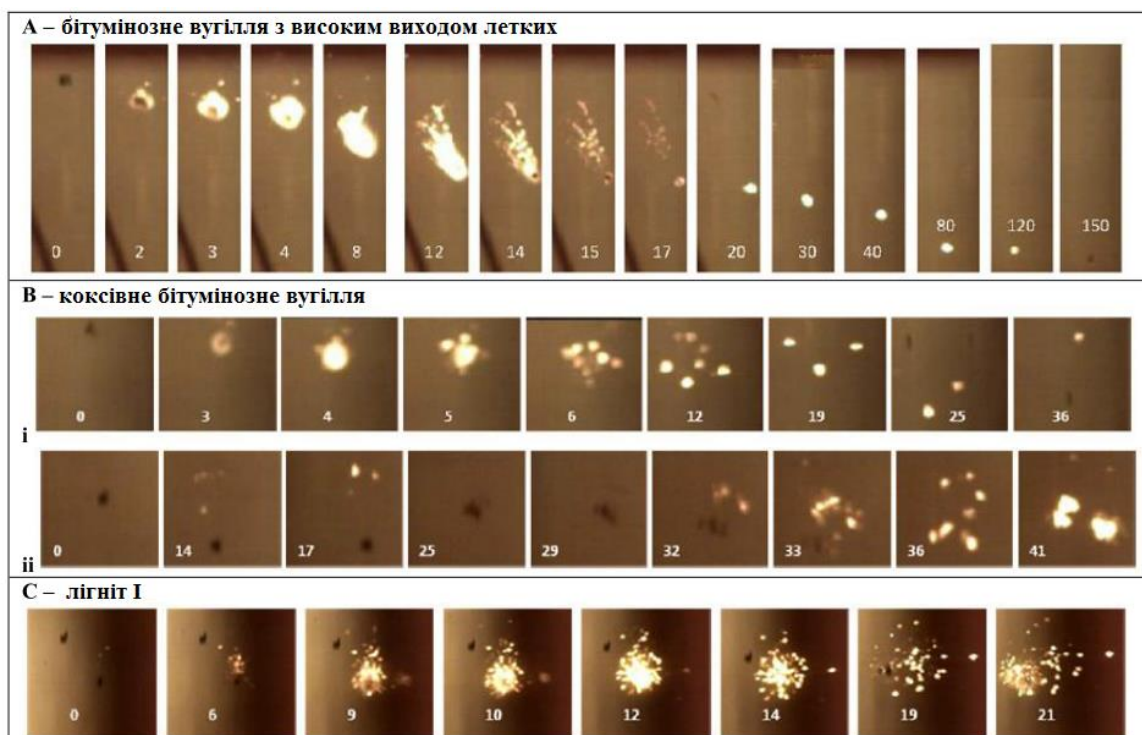


Рисунок 4 - Картинки з експериментів зі спалювання частинок різних палив у повітрі (на малюнках вказано час від появи частки в реакторі, мс) [11]

Слід зазначити, що дослідження горіння поодиноких часток вимагає певного, подекуди не дешевого (наприклад, у випадку високошвидкісної відеозйомки високої роздільної здатності) обладнання, а також планування та здійснення експериментів у такий спосіб, що дозволяє мати більш-менш прийнятну відтворюваність (повторюваність) результатів та їх подальшу обробку статистичними методами. При цьому важливою є навіть концепція побудови експериментальної установки для дослідження горіння поодиноких часток. Так, наприклад, результати, що отримані В.І. Бабієм з колегами, що були наведені на початку [1-3], виконувалися на установці, подібній до тої, принципова схема якої наведена на рис. 5.

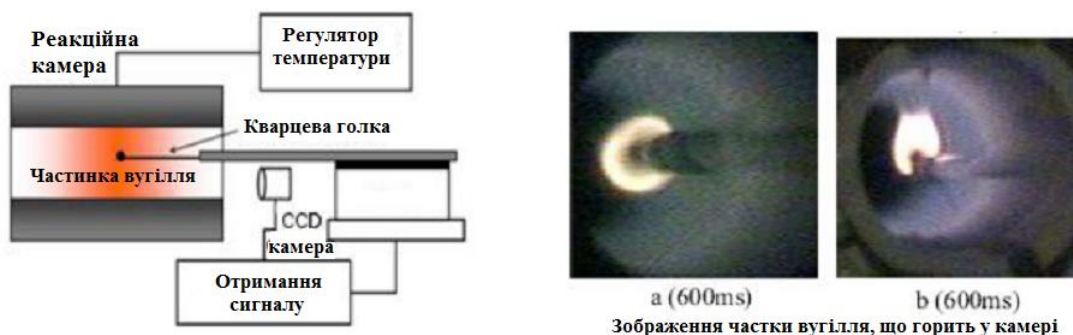


Рисунок 5 - Схема дослідницької установки з можливістю генерації мікрогравітації [12]

Показана на рис. 5 схема, як і багато подібних, має свої переваги та недоліки. Окремі з них не дозволяють достатньо адекватно моделювати горіння часток у факелі в топках котлоагрегатів або в потоці дуття доменної печі (в технології з вдуванням пиловугільного палива через горн), хоча із певними застереженнями окремі висновки та екстраполяції можливі.

Інші концепції побудови установок для подібних досліджень передбачають, наприклад, введення проби палива до реакційної камери, що є «точкою відліку» в досліді (рис. 6), «поштучне» введення часток палива до реакційної камери із контрольованою газовою атмосферою (рис. 7) та інші принципи.

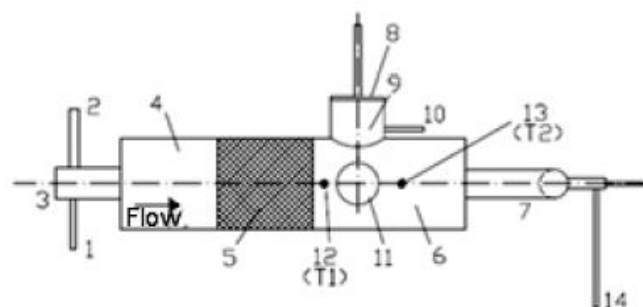


Рисунок 6 - Реактор періодичної дії [13]:

1 – вхід пропану; 2 – вхід повітря/O₂; 3 – пальник; 4 – камера згорання;
5 – керамічний наповнювач; 6 – камера реактора; 7 – вихід газів; 8 – кришка з поршнем; 9 – камера охолодження; 10 – вхід охолоджуючого газу; 11 – оглядове вікно;
12, 13 – термопари; 14 – відбір газу.

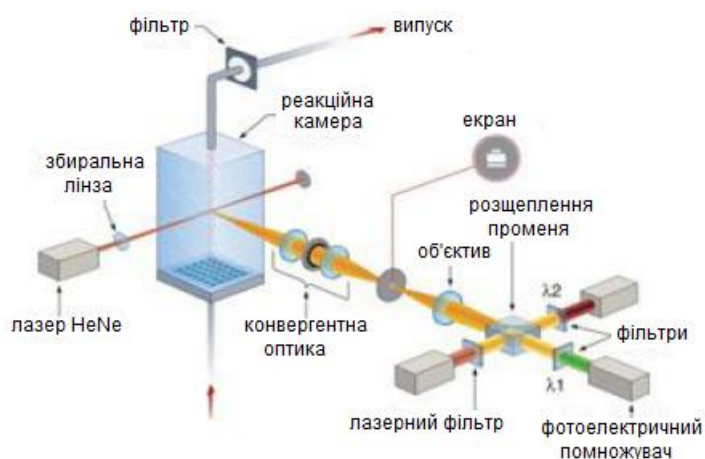


Рисунок 7 - Проточний реактор Sandia [14]

Найбільш близьким за будовою та принципом дії до дослідної устанówki, що використовувалася авторами, є концепт, показаний на рис. 8, а.

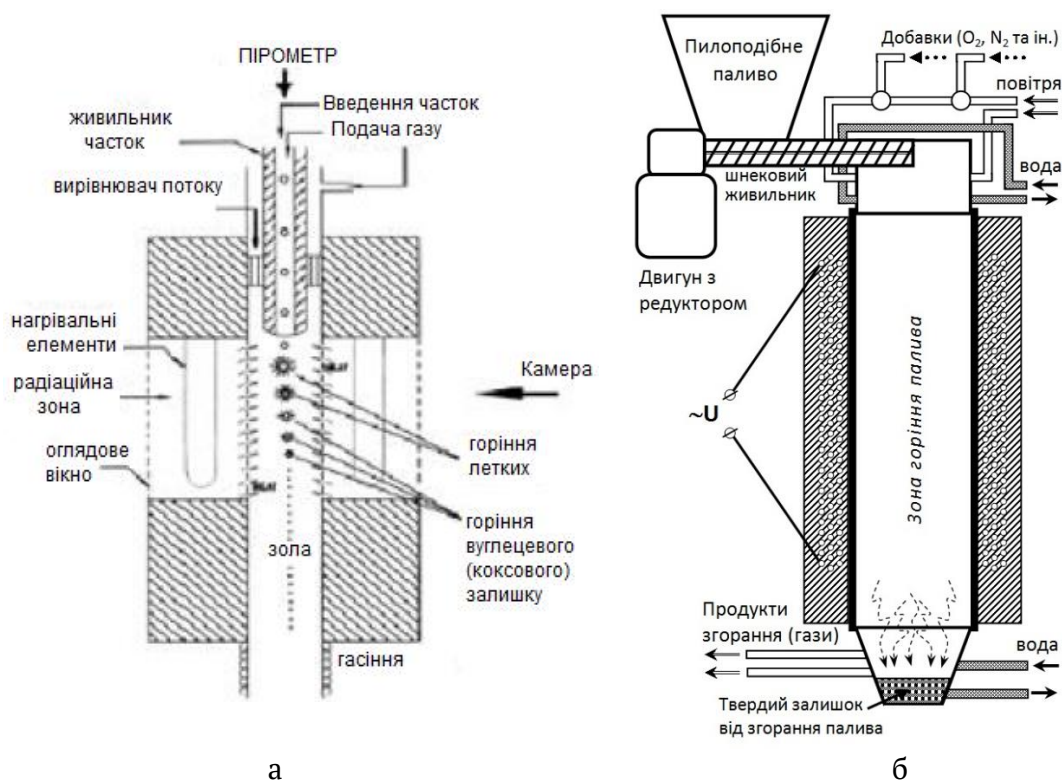


Рисунок 8 - Дослідницькі установки типу «вертикальна трубчаста піч» (drop tube furnace): а – стенд для дослідження поодиноких частинок в Північно-східному університеті, Бостон [11]; б – установка для досліджень горіння пилоподібного палива, що використовувалася авторами [15, 16]

На рис. 5-8 показані лише деякі конструктивні рішення та методичні підходи щодо дослідження горіння часток пилоподібного палива – як поодиноких (рис. 5, 8,а), так і в потоці (рис. 6, 7 та 8,б). У науковій періодиці оприлюднено чимало інших подібних методик з тим чи іншим оснащенням, але за загальною суттю ці методики мало відрізняються. Важливим завданням авторів у цьому контексті було уточнення даних щодо особливостей протікання початкових стадій горіння часток твердого палива, в т.ч. відходів різного походження, які вже були названі (деревна тріска, папір і картон, сільськогосподарські відходи, спеціальні енергетичні культури тощо). Як було свого часу доведено у роботі [17], саме початкові стадії горіння пилоподібного палива є вирішальними щодо ефективності його використання в цілому. Тут слід уточнити, що ефективність використання пилоподібного палива (вугілля, торф, лігнін, біомаса різного походження) має дещо різний зміст в енергетиці

та в металургії. В енергетиці критеріями ефективності використання палива можна вважати мінімальний механічний недопал при максимально можливому тепловому к.к.д. процесу горіння і агрегату (горілки) в цілому. В разі вдування в доменні печі ПВП, та його сумішей з легкозаймистими видами твердого палива на перший план виходять максимально можлива витрата палива з максимально можливим коефіцієнтом заміни коксу при збереженні стабільного ходу доменної печі та керованості й передбачуваності процесу в цілому.

Сировиною, з якої виготовляють ПВП для вдування в доменні печі, зазвичай було і залишається дотепер кам'яне вугілля. Як правило, - непридатне для коксування, але з високим вмістом вуглецю (антрацит, пісне та ін.) і якомога низькою кількістю золи та шкідливих домішок. Наприкінці минулого століття на європейських заводах концерну Thyssen Shtahl AG (зараз – ThyssenKrupp AG) та деяких інших було успішно випробувано і впроваджено вдування вугільних сумішей, додаючи до основного компонента ПВП певну кількість вугілля з високим виходом летких речовин [18].

В монографії А. Carpenter наводяться приклади вдування в доменну піч сумішей ПВП з вугіллям з високим виходом летких, а також з відходами пластмас. Щодо останніх висловлюється теза, що взаємодія між вугіллям та відходами пластмас може сприяти підвищенню ефективності згоряння ПВП, а також допоможе максимізувати продуктивність печі, водночас зменшуючи витрати та мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Серед проблем з пластмасами вказується складність їх підготовки щодо забезпечення стабільного фракційного та хімічного складу. Відмічається також, що досі не існує стандартних випробувань для визначення реакційної здатності вугілля або відходів пластмас в умовах доменної печі [19].

З початку 2000-х дедалі частіше з'являються публікації з результатами досліджень, присвячених вивченню горіння відносно нових видів палива, таких як біомаса різного походження та її похідні, побутові відходи на зразок гуми або пластмаси. Так, наприклад, перспективні інновації в Японії передбачають комбіновані сценарії вдування, в яких подрібнена руда або відновлювальні матеріали, такі як біомаса або відходи пластику, вводять в

доменні печі через фурми. Як очікується, подібні технології можуть допомогти вирішити сьгоднішні проблеми, пов'язані з викидами вуглекислого газу, виробництвом енергії та доступністю ресурсів [20]. Однак, застосування біомаси в металургійній промисловості все ще обмежене, а дані щодо її масового використання в доменних печах відсутні. Враховуючи сучасні світові тенденції, зокрема - Європейський зелений курс і прагнення забезпечення скорочення викидів парникових газів в країнах ЄС на 55 % до 2030 року [21] та відповідні ініціативи уряду України (НВВ2) [22] на думку авторів слід очікувати різкого підвищення інтересу з боку металургів до альтернативних видів палива. Зокрема таких, що мають мінімальний «вуглецевий слід» - біомаса різного походження та водень, як паливний додаток – замітник коксу. На думку авторів спалювання альтернативних видів палива буде найбільш ефективним у разі врахування певних характеристик, пов'язаних з їхньою природою (походженням), зокрема – температурою займання та кінетикою процесу горіння, особливо - його початкових стадій.

Мета дослідження

Метою дослідження було уточнення відомостей щодо початкових стадій горіння пилоподібного палива, а саме з'ясування зв'язку температури займання часток палива від його природи – виду, елементного складу та хімічного складу газів, що виділяються на стадії дегазації при нагріванні у безокиснювальному середовищі.

Основний матеріал дослідження

Для виготовлення пилоподібного палива використовували декілька видів вугілля різних ступенів метаморфізму, а також торф і лігнін. Технічний аналіз та елементний склад матеріалів, що використовувалися в дослідженнях, наведені в табл. 1. Вихідне вугілля та інші види палива після сушки піддавалися помелу до пилоподібного стану в кульовому барабанному млині. Помел здійснювався до крупності часток, що задовольняє вимогам щодо фракційного складу ПВП для вдування в доменні печі. Контроль фракційного складу пилоподібного палива після помелу здійснювався на вібротехнічних ситах Fritsh Analysette.

Таблиця 1

Технічний аналіз і елементний склад пилоподібного палива

Вид палива	Технічний аналіз, %				Вміст елементів на суху беззолну масу, %				
	W_i^r	A^d	S_i^d	V^{daf}	С	Н	О	Н	С/Н
ВУГІЛЛЯ:									
Антрацит	6,7	17,2	1,26	4,8	94,2	1,3	2,3	0,7	72,5
Пісне	10,0	9,5	1,82	10,6	91,9	3,8	0,6	1,7	24,2
Газове	11,6	11,4	1,66	35,6	80,1	5,2	11,1	1,7	15,4
Торф	55,0	30,6	0,28	62,8	57,6	6,1	33,5	2,5	9,4
Лігнін*	60,0	15,9	0,69	63,8	68,9	9,7	18,0	2,6	7,1

* – продукт переробки (кислотне варіння) сільськогосподарських відходів та деревної тріски

Завданням дослідження було вивчення для палив, що представлені у табл. 1, зв'язку між температурою їхнього займання та складом летких речовин, що виділяються при нагріванні. Одними з перших на подібний зв'язок ще півстоліття тому вказали Л. Богданді та Г. Енгель. Згідно даних, наданих цими авторами, цей зв'язок близький до функціонального (рис. 9).

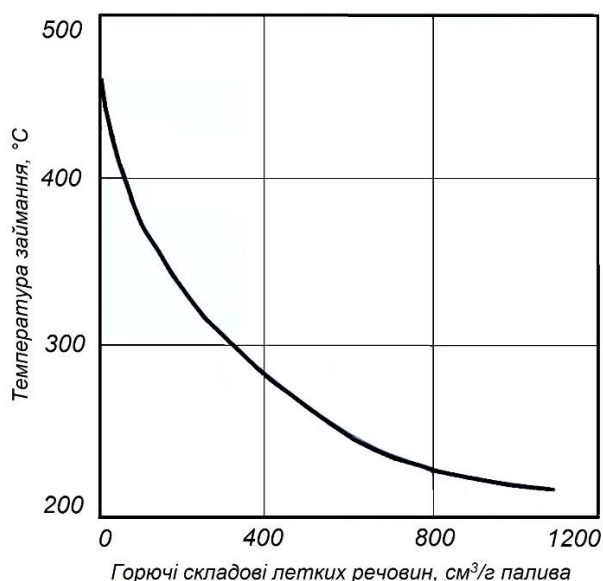


Рисунок 9 - Залежність температури займання від кількості горючих складових у складі летких речовин при нагріванні ПВП у безокиснювальному середовищі [5]

Для вирішення поставленого завдання на спеціально сконструйованій лабораторній установці дослідили склад летких речовин (газів), що виділяються при нагріванні палива у безокиснювальному середовищі.

Попередньо зважені проби палива опускали в спеціально виготовленому контейнері у розігріту до 800 (± 15) °С піч, з внутрішнього простору якої попередньо було видалене повітря (продувка аргоном). Гази, що виділялися в результаті термічної деструкції палива через поглинач (CaCl_2) подавалися з камери-уловлювача на вхід хроматографа «Пошук-2». Отримані результати представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Склад газів, що виділилися при нагріванні пилоподібного палива (характеристики наведені в табл. 1) у безокиснювальному середовищі

Гази складі летких	Вміст газів (% об.), що виділилися при нагріванні палива				
	Антрацит	Пісне вугілля	Газове вугілля	Торф	Лігнін
CO ₂	52,30	4,61	5,90	30,22	11,62
H ₂	27,88	47,57	36,16	23,99	22,17
N ₂	-	1,74	1,87	2,30	1,81
CH ₄	9,79	43,26	38,59	7,52	28,50
CO	10,03	2,82	17,48	35,97	35,90

Для визначення температури займання досліджуваних зразків палива використовувалася методика ІГС (колишній інститут гірничої справи), наведена в монографії [23]. Зв'язок між температурою займання досліджуваних видів палива та складом летких речовин, що виділяються при їхньому нагріванні, досліджували за допомогою кореляційного аналізу з перевіркою відповідних нуль-гіпотез. Результати досліджень представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати дослідження окремих властивостей пилоподібного палива (характеристики наведені в табл. 1)

Показники, що визначалися	Вид палива					Коеф. кореляції
	Антрацит	Пісне	Газове	Торф	Лігнін	
Температура займання, °С	419	431	399	315	301	-
Вихід летких речовин, %	4,79	10,6	35,3	62,8	63,8	0,96
Вихід з палива (H ₂ +CH ₄ +CO), дм ³ /г	0,18	0,99	1,49	1,84	2,99	0,86
Вміст CO в горюч. складовій летких, %об	21,03	3,01	18,95	53,32	41,47	0,92
Вміст CO в летких речовинах, %об	10,03	2,82	17,48	35,97	35,90	0,98
Вихід з палива CO, $\times 10$ дм ³ /г	3,84	2,99	28,14	97,90	123,89	0,99

Дані, що наведені у табл. 3, свідчать про тісний зворотно-пропорційний зв'язок між температурою займання палива з виходом летких речовин – відповідний коефіцієнт кореляції склав 0,96. Ці дані дозволяють уточнити висновки авторів [5] щодо залежності температури займання від кількості горючих складових у складі летких речовин ПВП, а саме: температура займання палива функціонально залежить від вмісту СО в летких речовинах, вихід якого з палива може бути одним з важливих критеріїв при оцінці горючості (займистості).

Слід зазначити, що температура займання тісно (прямо пропорційно) пов'язана з часом до займання – чим вищою вона є, тим довше триває стадія прогріву часток палива до займання летких речовин (див. формулу 1 на початку), що було експериментально підтверджено на дослідній установці для високошвидкісного ДТА [24].

В дослідженнях, результати яких оприлюднено у [25], було показано можливість інтенсифікації процесу горіння ПВП шляхом додавання до його складу вугілля з високим виходом летких речовин та уточнено окремі важливі аспекти. Горіння потоку часток пилоподібного палива у названих дослідженнях здійснювалося авторами на установці типу «вертикальна трубчаста піч», опис якої вперше був оприлюднений в роботі [26]. Пізніше цю установку було удосконалено з метою усунення окремих недоліків і розширення можливостей щодо моделювання заключних стадій горіння ПВП [15]. Принципова (спрощена) схема установки наведена на рис. 8,б.

Технічний аналіз вихідного палива, а також аналіз залишку після його горіння проводили згідно вимог відповідних стандартів [27, 28] та з використанням вдосконаленої методики [15], за якою обчислювали т.з. «повноту згорання» для того чи іншого палива. В результаті було встановлено тісний зв'язок між температурою займання палива та повнотою його згорання на початкових стадіях, але аналіз отриманих у цих дослідженнях даних потребує окремого розгляду та обговорення.

5. Висновки і перспективи подальших досліджень

Аналіз розвитку методології дослідження горіння пилоподібного палива за останні півстоліття та результатів відповідних досліджень показує, що на сьогодні сформовані чіткі уявлення щодо процесу горіння як поодиноких паливних часток, так і горіння їх у факелі. Перш за все це стосується поділу процесу горіння твердого пилоподібного палива на стадії, що мають свої характеристики та певний вплив на ефективність використання (спалювання) палива в цілому. Окремими дослідженнями показано, що для деяких видів палива поділ на стадії процесу горіння часток є вельми умовним, оскільки через природу (походження) паливної сировини окремі стадії можуть накладатися одна на одну або взагалі бути відсутні. Тим не менше, на думку авторів, з методичної точки зору такий підхід залишається актуальним для будь якого палива, особливо у випадках, коли спалювання вимагає максимально повного згорання великої маси за короткий проміжок часу.

Незалежно від критеріїв ефективності використання палива для розробки найбільш ефективних технологій його спалювання слід враховувати не тільки специфіку (умови) тих чи інших агрегатів та процесів, але й природу (походження) паливної сировини, що використовується, оскільки вона безпосередньо визначає фізико-хімію процесу горіння.

Підтверджені авторами дані щодо тісного зв'язку між температурою займання палива та виходом з нього летких речовин дозволяють уточнити, що температура займання палива функціонально залежить від вмісту СО в летких речовинах, вихід якого з палива може бути одним з важливих критеріїв при оцінці його горючості (займистості).

На думку авторів температура займання може використовуватися як параметр, який слід враховувати (а в окремих випадках – визначати), оскільки вона тісно пов'язана як з часом до займання часток палива, так і з повнотою його згорання на початкових стадіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабій В.І., Іванова І.П. Про температуру вугільних частинок при горінні // Теплоенергетика, 1968. – №2. – С. 34-37.

2. Бабій В.І., Куваєв Ю.Ф. Горіння вугільного пилу і розрахунок пиловугільного факелу. – Енергоатоміздат, 1986. 209 с.
3. Бабій В.І., Іванова І.П. Тривалість займання і горіння часток пилу різних марок вугілля // В кн.: Горіння твердого палива (Праці III конф. з горіння твердого палива). – Новосибірськ: Наука, 1969. – С. 82-92.
4. Rianza J et al. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass // Fuel (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.011>
5. Богданді Л., Енгель Г.Ю. Відновлення залізних руд. Пер. з нім. – Металургія, 1971. – 519 с.
6. Jappe Frandsen F., Wu H., Glarborg, P. et al. (2011). DTU Research Database. PSO Project 10085: Final Report – Co-Firing of Coal and RDF in Suspension. DTU Chemical Engineering. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/58570614/prod21378460578762.R1202_PSO_Project_10085_Co_Firing_of_Coal_and_RDF_in_Suspension.pdf
7. Variny, M., Varga, A., Rimár, M. et al. Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review. Processes 2021, 9, 100. <https://doi.org/10.3390/pr9010100>
8. Marek Ewa, Stańczyk Krzysztof. Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // Journal of Sustainable Mining. Vol. 12 (2013), No. 3, pp. 17–31. <https://doi.org/10.7424/jsm130303>
9. Khatami R., Stivers C., Joshi K. et al. (2012) Combustion behavior of single particles from three different coal ranks and from sugar cane bagasse in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres // Combustion and Flame Vol. 159, pp. 1253–1271. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.009>
10. Xiaojing Bai, Gang Lu, Tom Bennet et al. Combustion behavior profiling of single pulverized coal particles in a drop tube furnace through high-speed imaging and image analysis // Experimental Thermal and Fluid Science 85 (2017) 322–330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.018>
11. Levendis Y.A., Joshi K., Khatami R. et al. Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse. Combustion and Flame. (2011) Vol. 158, pp. 452–465. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.007>
12. Tang G., Zhang H., Zhu M. et al. Experimental Study on the Ignition Process of Single Coal Particles at Microgravity // Microgravity Science and Technology. (2010) Vol. 22, pp. 27–35. <https://doi.org/10.1007/s12217-008-9101-9>
13. Ponzio A., Senthorselvan S., Yang W. et al. Ignition of single coal particles in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations // Fuel (2008): Vol. 87, pp. 974–998. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.027>
14. Murphy J.J., Shaddix C.R. (2006): Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments // Combustion and Flame Vol. 144, pp. 710–729. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.08.039>
15. Ступак Ю.О. Вивчення процесу горіння пиловугільного палива у лабораторних умовах // Изв. вузів. Чорна металургія. 1993. №8. С. 35-36.
16. Ступак Ю.О. Про деякі особливості лабораторних досліджень процесу горіння пилоподібного палива / В мат-лах міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні - ІТММ'2021» (16 – 18 березня 2021 р., Дніпро, Україна). – Дніпро: НМетАУ, 2021. –С. 47-52. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.006>
17. Ступак Ю.О. Розробка методів інтенсифікації горіння твердих додатків, що містять вуглець, у доменній печі. Дисс. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук зі спец. 06.16.02. – Дніпропетровськ, 1994. – 205 с.

18. Gudenau H. Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen - Steuerung der Einblasrate durch den Einsatz von Kohlemischungen / H.W. Gudenau, B. Korthas, R. Kiesler, L. Birkhauser // Stahl und Eisen. – 1990. – №11. – P. 35-40.
19. Carpenter A. Injection of coal and waste plastics in BF's // United States Energy Association (USEA). (2010) <http://surl.li/spixc>
20. Clean Coal Technologies in Japan. Technological Innovation in the Coal Industry. 2nd Edition. NEDO. Kawasaki City, 2015. 148 p. <https://www.nedo.go.jp/content/100861237.pdf>
21. Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets // European Commission official portal. – [Electronic resource]. – Access mode: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754
22. The government approved the goals of Ukraine's climate policy until 2030 // Government portal: The single web portal of the executive authorities of Ukraine. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-cili-klimatichnoyi-politiki-ukrayini-do-2030-roku>
23. Скляр М.Г., Тютюнников Ю.В. Хімія твердих горючих копалин. – К.: Вища школа, 1985. – 247 с.
24. Ступак Ю.О. Метод диференційного термічного аналізу в дослідженнях деструкції твердого пилоподібного палива за високої швидкості нагрівання / В мат-лах міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні - ІТММ'2024» (10 – 11 квітня 2024 р., Дніпро, Україна). – Дніпро: УДУНТ, 2024. – С. 81-89. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.014
25. Stupak Yu., Khokhlova T. (2021) On some aspects of the study of pulverized coal and fuel mixtures combustion in a drop tube furnace. Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. №24. 2021. – С. 119-131. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.12>
26. Бондаренко П.К. Моделювання процесу горіння пиловугільного палива у фурмі доменної печі / П.К. Бондаренко, В.І. Котов, Ю.О. Ступак // Изв. вузов. Чорна металургія. – №7. – 1990. – С.103.
27. Вугілля. Технічний аналіз : ДСТУ ISO 17246:2010. [Чинний від 2012-01-07] . – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 4 с.
28. Паливо тверде мінеральне. Методи визначення зольності. ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-97). [Чинний від 1997-07-01]. – Мінськ: ВПК «Вид-во стандартів», 1996. – 8 с.

REFERENCES

1. Babii V.I., Ivanova I.P. Pro temperaturu vuhilnykh chastynok pry horinni // Teploenerhetyka, 1968. – №2. – S. 34-37.
2. Babii V.I., Kuvaiev Yu.F. Horinnia vuhilnoho pyly i rozrakhunok pylovuhilnoho fakelu. – Enerhoatomizdat, 1986. 209 s.
3. Babii V.I., Ivanova I.P. Tryvalist zaimannia i horinnia chastok pyly riznykh marok vuhillia // V kn.: Horinnia tverdoho palyva (Pratsi III konf. z horinnia tverdoho palyva). – Novosibirsk: Nauka, 1969.– S. 82-92.
4. Rianza J et al. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass // Fuel (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.011>
5. Bohdandi L., Enhel H.Iu. Vidnovlennia zaliznykh rud. Per. Z nim. – Metalurhiia, 1971. – 519 s.
6. Jappe Frandsen F., Wu H., Glarborg, P. et al. (2011). DTU Research Database. PSO Project 10085: Final Report – Co-Firing of Coal and RDF in Suspension. DTU Chemical Engineering. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/58570614/prod21378460578762.R1202_PSO_Project_10085_Co_Firing_of_Coal_and_RDF_in_Suspension.pdf

7. Variny, M., Varga, A., Rimár, M. et al. Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review. *Processes* 2021, 9, 100. <https://doi.org/10.3390/pr9010100>
8. Marek Ewa, Stańczyk Krzysztof. Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // *Journal of Sustainable Mining*. Vol. 12 (2013), No. 3, pp. 17–31. <https://doi.org/10.7424/jsm130303>
9. Khatami R., Stivers C., Joshi K. et al. (2012) Combustion behavior of single particles from three different coal ranks and from sugar cane bagasse in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres // *Combustion and Flame* Vol. 159, pp. 1253–1271. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.009>
10. Xiaoqing Bai, Gang Lu, Tom Bennet et al. Combustion behavior profiling of single pulverized coal particles in a drop tube furnace through high-speed imaging and image analysis // *Experimental Thermal and Fluid Science* 85 (2017) 322–330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.018>
11. Levendis Y.A., Joshi K., Khatami R. et al. Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse. *Combustion and Flame*. (2011) Vol. 158, pp. 452–465. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.007>
12. Tang G., Zhang H., Zhu M. et al. Experimental Study on the Ignition Process of Single Coal Particles at Microgravity // *Microgravity Science and Technology*. (2010) Vol. 22, pp. 27–35. <https://doi.org/10.1007/s12217-008-9101-9>
13. Ponzio A., Senthorselvan S., Yang W. et al. Ignition of single coal particles in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations // *Fuel* (2008): Vol. 87, pp. 974–998. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.027>
14. Murphy J.J., Shaddix C.R. (2006): Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments // *Combustion and Flame* Vol. 144, pp. 710–729. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.08.039>
15. Stupak Yu.O. Vychennia protsesu horinnia pylovuhilnoho palyva u laboratornykh umovakh // *Izv. vuziv. Chorna metalurhiia*. 1993. №8. S. 35–36.
16. Stupak Yu.O. Pro deiaki osoblyvosti laboratornykh doslidzhen protsesu horinnia pylopodibnoho palyva / V mat-lakh mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni - ITMM'2021» (16 – 18 bereznia 2021 r., Dnipro, Ukraina). – Dnipro: NMetAU, 2021. –S. 47–52. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.006>
17. Stupak Yu.O. Rozrobka metodiv intensyfikatsii horinnia tverdykh dodatkov, shcho mistiat vuhlets, u domennii pechi. Dyss. na zdobuttia nauk. st. kand. tekhn. nauk zi spets. 06.16.02. – Dnipropetrovsk, 1994. – 205 s.
18. Gudenau H. Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen - Steuerung der Einblasrate durch den Einsatz von Kohlemischungen / H.W. Gudenau, B. Korthas, R. Kiesler, L. Birkhauser // *Stahl und Eisen*. – 1990. –№11. – P. 35–40.
19. Carpenter A. Injection of coal and waste plastics in BFs // *United States Energy Association (USEA)*. (2010) <http://surl.li/spixc>
20. *Clean Coal Technologies in Japan. Technological Innovation in the Coal Industry*. 2nd Edition. NEDO. Kawasaki City, 2015. 148 p. <https://www.nedo.go.jp/content/100861237.pdf>
21. Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets // *European Commission official portal*. – [Electronic resource]. – Access mode: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754
22. The government approved the goals of Ukraine's climate policy until 2030 // *Government portal: The single web portal of the executive authorities of Ukraine*. – [Electronic resource]. –

- Access mode: <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-cili-klimatichnoyi-politiki-ukrayini-do-2030-roku>
23. Skliar M.H., Tiutiunnykov Yu.V. Khimiia tverdykh horiuchykh kopalyn. –K.: Vyshcha shkola, 1985. – 247 s.
24. Stupak Yu.O. Metod dyferentsiinoho termichnoho analizu v doslidzhenniakh destrukttsii tverdoho pylopodibnoho palyva za vysokoi shvydkosti nahrivannia / V mat-lakh mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni - ITMM'2024» (10 – 11 kvitnia 2024 r., Dnipro, Ukraina). – Dnipro: UDUNT, 2024. –S. 81-89. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.014
25. Stupak Yu., Khokhlova T. (2021) On some aspects of the study of pulverized coal and fuel mixtures combustion in a drop tube furnace. Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. №24. 2021. – С. 119-131. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.12>
26. Bondarenko P.K. Modeliuvannia protsesu horinnia pylovuhilnoho palyva u furmi domennoi pechi / P.K. Bondarenko, V.I. Kotov, Yu.O. Stupak // Izv. vuzov. Chorna metalurhiia. –№7. – 1990. –S.103.
27. Vuhillia. Tekhnichniy analiz : DSTU ISO 17246:2010. [Chynnyi vid 2012–01–07] . – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2014. – 4 s.
28. Palyvo tverde mineralne. Metody vyznachennia zolnosti. HOST 11022-95 (ISO 1171-97). [Chynnyi vid 1997–07–01]. – Minsk: VPK «Vyd-vo standartiv», 1996. –8 s.

Received 13.02.2024.

Accepted 18.03.2024.

UDC 669.162.22+267.4

T.Khokhlova, Y.Stupak

STUDY OF THE DUSTY SOLID FUEL COMBUSTION AND THE INFLUENCE OF ITS INDIVIDUAL PROPERTIES ON THE COURSE OF THE COMBUSTION INITIAL STAGES

The article discusses separate methodological approaches to modeling the combustion of pulverized fuel in laboratory conditions, which have been developed over the past decades, and separate results of research into the combustion of individual particles using high-speed photo and video recording. It is shown that today clear ideas have been formed regarding the process of burning both individual fuel particles and their burning in a torch. It is noted that for some types of fuel, the division of the combustion process of particles into stages is very conditional, because due to the nature (origin) of the fuel raw materials, individual stages may overlap one another or be absent altogether. The thesis is put forward that, regardless of the criteria for the efficiency of fuel use, for the development of the most effective technologies for its combustion, not only the specifics (conditions) of certain units and processes, but also the nature (origin) of the fuel raw materials used, as it directly determines physics and chemistry of the combustion process. The authors experimentally confirmed a close relationship between the ignition temperature of the fuel and the release

of volatile substances from it, in particular, it was found that the ignition temperature of the fuel functionally depends on the content of CO in volatile substances, the release of which from the fuel can be one of the important criteria when assessing its flammability. The thesis is put forward about the expediency of using the "ignition temperature" parameter as such, which should be taken into account (and in some cases - determined), since it is closely related to both the time to ignition of fuel particles and the completeness of its combustion in the initial stages, which was proved experimentally.

Keywords: pulverized fuel, stages of combustion, single fuel particles, biofuel, release of volatile substances, ignition temperature, completeness of combustion

Ступак Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теорії, технології та автоматизації металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій, Нікопольський факультет, м Дніпро. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7199-057X>

Хохлова Тетяна Станіславівна – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри термічної обробки металів ім. К.Ф.Стародубова, декан факультету, Український державний університет науки і технологій, Нікопольський факультет, м Дніпро. ORCID: <http://orcid.org/orcid.org/0000-0002-1711-0404>

Stupak Yurii - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theory, Technology and Automation of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nikopol Faculty, Dnipro
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7199-057X>

Khokhlova Tatyana - Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat Treatment of Metals named after K.F. Starodubov, Dean of the Faculty, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nikopol Faculty, Dnipro
ORCID: <http://orcid.org/orcid.org/0000-0002-1711-0404>