

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**

УДК 662.612

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.5

© Хаджинов Є.О.<sup>1</sup>, Хаджинов О.С.<sup>2</sup>**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІННЯ  
ОДИНОЧНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ ЧАСТИНОК  
В СЕРЕДОВИЩАХ O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O ТА O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O**

Розглянуто можливість використання кінозйомки як методу дослідження процесу горіння одиночних частинок вуглецю. Розроблено і побудовано експериментальну установку, яка відрізняється від існуючих простотою її монтажу і проведенням експериментів. Проведено експериментальні дослідження процесу горіння частинок графіту в середовищах O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O і O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> при наступних параметрах: фракційний діапазон часток 0,16-2 мм, температура в реакційній зоні 900-1150°C, концентрація кисню в суміші 43-100%. Показано вплив концентрації парів води в суміші на питому швидкість протікання процесу горіння. Показано, що заміна інертного газу (N<sub>2</sub>) в окислювальній атмосфері на H<sub>2</sub>O призводить до інтенсифікації реакції і збільшення реакційної здатності палива. Експериментально встановлено, що відносна реакційна здатність графіту в середовищі O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O на 19% вище, ніж в середовищі O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>.

**Ключові слова:** парокиснева газифікація, реакційна здатність твердого палива, одиночна частка, швидкість горіння.

**Y.A. Khadzhyonov, O.S. Khadzhyonov. Experimental study of the combustion of single carbon particles in the atmospheres O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O.** A research method of single carbon particles combustion process has been developed using high-speed filming. A new experimental device has been designed and built, easy to setup and run, which makes it possible to measure the combustion time of a fuel particle lying at the bottom of the reactor and blown by a gas flow. An experimental research of combustion processes of graphite particles was carried out in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O atmospheres using following parameters: fractional range 0,16-2 mm particles, the temperature in the reaction zone was 900-1150°C, the concentration of oxygen in the mixture was 43-100%. The studies were carried out at gas flow rates that do not affect the combustion rate of the particle, with a completely sufficient amount of oxygen in terms of balance for complete combustion, based on the initial mass of the particle. The experimental results show the effect of water vapor concentration in the mixture at a specific combustion rate. It has been shown that replacing the inert gas in an oxidizing atmosphere with H<sub>2</sub>O leads to the process intensification and increases relative reactive capacity of fuel. There relative reactivity of graphite to be up to 19% higher in the O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O environment than in the O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> atmospheres. The influence of concentration of O<sub>2</sub> on the rate is the liquidity of combustion in the oxidative sum of O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O is of a small linear nature and is especially strongly manifested at fractions less than 0.3 mm. On big fractions (> 1 mm) it is very faintly visible.

**Keywords:** steam-oxygen gasification, reactivity of solid fuel, single particle, combustion rate.

<sup>1</sup>magictp, [evgen.visi@gmail.com](mailto:evgen.visi@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

**Постановка проблеми.** Нині дедалі ширшого поширення набувають процеси газифікації твердого палива, насамперед вугілля. Основою будь-якого твердого палива є вуглець. Як газифікуючий агент застосовуються кисень і суміші кисню з парами води або двоокисом вуглецю.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результати низки дослідників вказують на залежність швидкості газифікації частинок твердого палива за допомогою  $O_2$ ,  $H_2O$  та  $CO_2$  від хімічного складу вихідної сировини [1-3]. Ці експериментальні дослідження, як і більшість інших, в основному проводилися за низьких температур, щоб позбутися впливу дифузійних процесів. Таким чином, переважна більшість досліджень газифікації частинок твердого палива проводилася за умови суто кінетичного режиму горіння. Згідно даних [4, 8], практично всі реальні процеси газифікації вугільного палива, що протікають при високих температурах, лімітуються тільки масообмінними процесами на поверхні частки палива і не залежать від кінетичної константи швидкості. Тому для опису реальних високотемпературних процесів доводиться покладатися на апроксимацію отриманих даних і сподіватися на достовірність отриманих результатів.

В даний час існує безліч даних щодо газифікації різних видів твердого палива в середовищах  $O_2$ ,  $CO_2$  та їх сумішей. Останні дослідження горіння частинок твердого палива в середовищі  $O_2/CO_2$ , проведені Левендісом, Хатамі, Бежерано та ін., показали, що заміна азоту вуглекислим газом призводить до зниження температури поверхні частинок, що горять, і уповільнення реакції [6, 7]. Ряд інших, більше ранніх досліджень більш-менш підтверджують ці результати. Однак експериментальних даних щодо взаємодії твердого палива із сумішами  $O_2/H_2O$  практично немає. Теоретично реакції взаємодії вуглецю з  $CO_2$  і  $H_2O$  протікають за схожим механізмом [8], що дозволяє припустити, що швидкість реакції та реакційна здатність палива в цих середовищах буде однаковою. Дане припущення вимагає експериментального підтвердження чи спростування.

**Мета статті** – проведення експериментальних досліджень взаємодії вуглецевих частинок із середовищем  $O_2/H_2O$ , виявлення загальних закономірностей та впливу парів води на підсумкову швидкість перебігу реакції та реакційну здатність твердого палива.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставленої задачі була модифікована розроблена раніше установка [9]. Вона дозволяє вимірювати час згоряння частки палива, що лежить на дні реактора, і потоку газу, що обдувається. В експериментах температура реактора і газу підтримувалася постійною і могла задаватися в діапазоні від 1073 до 1523 К. Для контролю часу згоряння використовувався оптичний метод дослідження, який полягає в швидкісній фотозйомці частки палива в процесі горіння. Схему експериментальної установки представлено на рис. 1.

Реактор у вигляді пробірки з хімічно та термічно стійкого матеріалу (до 2300 К) поміщений вертикально у робочу камеру трубчастої лабораторної печі. Регулювання температури печі здійснювалося плавним регулюванням напруги електричного джерела живлення. Це дозволило підтримувати температуру у реакторі з похибкою трохи більше  $5^\circ C$ . Вимірювання температури здійснюється за допомогою каліброваної платино-платинородієвої термопари, введеної в трубчасту піч максимально близько до зони протікання реакції, як показано на рис. 1. Вільні кінці термопари підключені до автоматичного потенціометра, що дозволяє безперервно контролювати температуру в ході експерименту. У робочій камері печі підтримувалася певна окисна атмосфера, що досягалося за рахунок її гарної герметизації. Підведення окисної суміші в робочий простір печі здійснюється знизу через трубку з кварцового скла.

Одиночна частка вкидалася в реактор через отвір у верхній частині. Подача окислювальної суміші в реактор здійснювалася через спеціально прорізаний бічний отвір в нижній частині реактора, розміром  $2 \times 5$  мм. Спостереження за палаючою частинкою та фотозйомка велася зверху. Фотокамера та пірометр закріплювалися над піччю на координатнику, що дозволяє регулювати відстань від об'єктива до об'єкта.

Відеозйомка процесу горіння за допомогою камери з макрооб'єктивом проводилася з частотою 50 кадрів/с. Отримані відеофайли розбивалися на кадри та оброблялися на комп'ютері. За початок процесу горіння приймався момент, коли частка починала світитися на тлі денця реактора, що означало розвиток автотермічного розігріву частки. В процесі розігріву частки при

температурах 500-750°C спостерігалось горіння летких компонентів і потім починалось горіння коксового залишку. Закінченням процесу горіння вважався момент повного згорання частки.

Дослідження проводили на фракціях: 1,6-2,0; 1,0-1,2; 0,8-1; 0,315-0,5; 0,2-0,25 та 0,16-0,2 мм. Для усунення впливу розкиду розмірів частинки кожної фракції проводилося 30 дослідів, після чого результати піддавалися статистичній обробці. При цьому відносно середньоквадратичне відхилення результату вимірювання часу горіння частки не перевищувало 3%.

Вимірювання проведені на газових сумішах  $O_2/N_2$  (повітря),  $O_2/H_2O$  (26% та 47% об'ємних  $H_2O$ ) та чистому кисні. Витрата кисню та повітря вимірювалася за допомогою ротаметрів. Отримання суміші  $O_2/H_2O$  здійснювалося в термостаті, який підтримував задану температуру з точністю 1 К. Кисень з балона підводився в колбу з підігрітою дистильованою водою, де він насичувався парами води в потрібній пропорції, і потім отримана суміш по газопроводу, що обігривається, подавалася в робочий проміжок. Нагріта до заданої температури печі газова суміш через отвір в реакторі направлялася на частинку палива. Контроль співвідношення  $O_2/H_2O$  здійснюється за температурою води у колбі термостата.

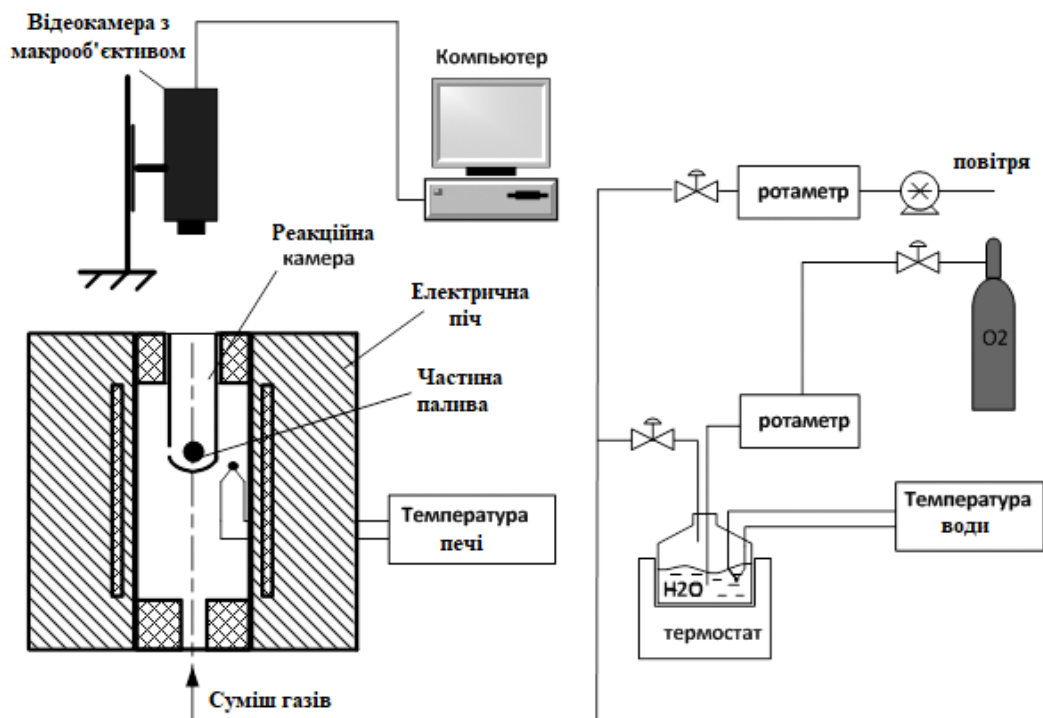


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження кінетики згорання одиночних частинок твердого палива

Дослідження проводилися при швидкостях газового потоку, що не впливають на швидкість горіння частки, причому достатньої кількості кисню по балансу для повного згорання. На підставі результатів цілого ряду експериментальних досліджень як авторів даної роботи, так і результатів інших дослідників [5], було встановлено, що при числах Рейнольдса, менших за 1, коефіцієнт Нуссельта, що характеризує масообмінні процеси, не залежить від швидкості газового потоку і дорівнює 2. При  $1 < Re < 10$  залежність  $Nu$  від  $Re$  має слабо виражений характер. У наших експериментах витрата окислювача в робочу камеру печі підбиралася таким чином, щоб розрахункове число  $Re$  було  $< 5$ . У той же час витрата окислювача має бути достатньо великою для забезпечення повного згорання палива з надлишком. Відсутність впливу витрати окислювача на швидкість вигорання частинок графіту в робочому діапазоні витрат експериментально підтверджено для частинок розміром від 0,16 до 2 мм. Зі зростанням  $Re > 10$  час згорання частинок зменшувався.

Дані за питомою швидкістю згорання одиночних частинок графіту були отримані при згоранні частинок у суміші  $H_2O$  та  $O_2$  з об'ємним вмістом  $O_2$  у діапазоні 53-100 %. Розмір фрак-

цій графітових частинок змінювався від 0,16 до 2 мм. Вплив діаметра частинок на питому швидкість згоряння представлено рис. 2.

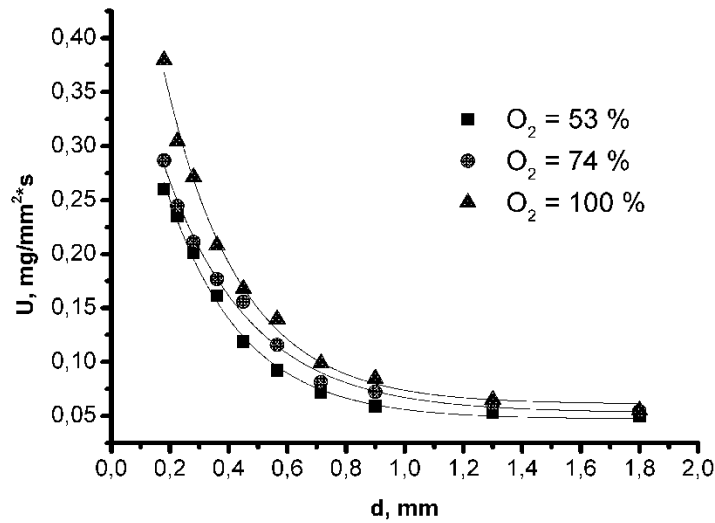


Рис. 2 – Залежність питомої швидкості згоряння частинок графіту серед O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O від розміру часток

Отримані дані щодо питомої швидкості згоряння були апроксимовані за допомогою стачечної функції. Значення середньої питомої швидкості згоряння частки за період горіння, приведені до одиниці поверхні, визначалося за такою формулою

$$U = \frac{m}{F \cdot \tau}, \frac{мг}{мм^2 \cdot с}, \quad (1)$$

де  $m = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$  – маса частки цієї фракції, мг; d – початковий діаметр частинки, мм; F – середня площа поверхні сферичної частки даної фракції у період горіння, мм<sup>2</sup>; τ – середній час згоряння частки цієї фракції, с.

Площа F визначалася як середня арифметична між F<sub>нач</sub> і F<sub>кінц</sub>, де  $F_{нач} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , а F<sub>кінц</sub> = 0.

Вплив концентрації O<sub>2</sub> в окислювальній суміші особливо сильно проявляється на фракціях менших, ніж 0,3 мм. На великих фракціях (> 1 мм) воно слабо відчутно. Загалом, як видно з рис. 3, залежність питомої швидкості згоряння від концентрації O<sub>2</sub> в газовій фазі носить лінійний характер, що говорить про перший порядок реакції [5]. Авторами [8] також було виявлено, що газифікація вугілля паром розвивається, як реакція першого порядку.

Групою вчених ВТІ ім. Дзержинського під керівництвом В.І. Бабія при обробці експериментальних даних було встановлено, що час вигорання коксового залишку частинок пилу вугілля різних марок при горінні їх у дифузійному режимі та при малих швидкостях обдування (Re < 1) може бути розраховано за єдиним рівнянням [4]:

$$\tau = k \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A}{100} \cdot \frac{\rho \cdot d^2}{T_G^{0,9} \cdot O_2}, \quad (2)$$

де τ – час горіння коксового залишку, с; k – експериментальний коефіцієнт, що характеризує специфіку вигорання частинок вугілля цієї марки; A – внутрішня зольність коксового залишку, %; O<sub>2</sub> – об'ємна концентрація кисню, %; T<sub>G</sub> – температура газової фази, К; ρ – густина коксового залишку, кг/м<sup>3</sup>; d – початковий діаметр частинки, мм.

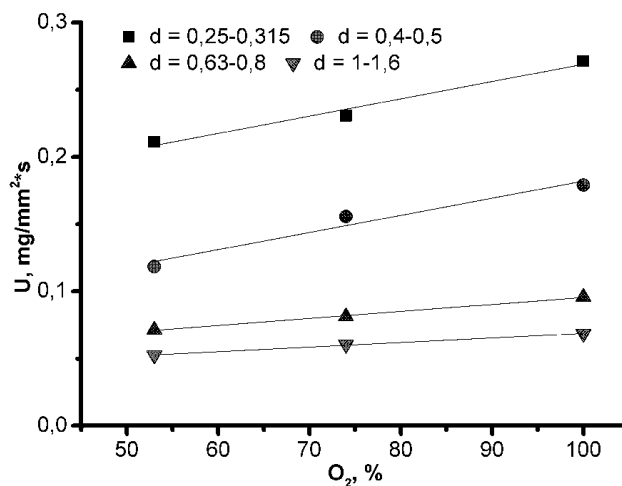


Рис. 3 – Залежність питомої швидкості згоряння частинок графіту серед  $O_2/H_2O$  від концентрації  $O_2$  в суміші

Отримані дані за часом згоряння частинок графіту серед  $O_2/H_2O$  були оброблені за допомогою вищенаведеного рівняння (2). Теоретично передбачити значення коефіцієнта  $k$  важко. Найбільш надійним є визначення його експериментальним шляхом. Обробка великої кількості експериментальних даних різних дослідників показала, що значення  $k$  можна прийняти постійним для вугілля кожної марки при широкому варіюванні розмірів частинок (від 20 до 1000 мкм) та параметрів газового середовища в інтервалі  $T_r = 1200-1700$  К,  $O_2 = 5-100\%$ . Авторами [4] було показано, що значення  $k$  для вугілля різних марок змінюється від 0,5 до 2,5.

По куту нахилу прямої, що екстраполює отримані дані, було визначено кількісне значення  $k$  для електродного графіту в середовищі  $O_2/H_2O$  – 1,53. Значення  $k$  для графіту серед  $O_2/N_2$  дорівнювало 1,88. Отже можна дійти невтішного висновку, що відносна реакційна здатність графіту серед  $O_2/H_2O$  на 19 % вище, ніж серед  $O_2/N_2$ . Це показує, що заміна азоту на водяну пару в окислювальній суміші призводить до збільшення реакційної здатності палива.

### Висновки

У ході роботи було освоєно метод дослідження процесу горіння одиночних частинок вуглецю за допомогою кінозйомки. Розроблено та побудовано експериментальну установку, що відрізняється від існуючих простотою її збору та проведенням експериментів.

Вперше були проведені експериментальні дослідження процесу горіння частинок графіту в середовищі  $O_2/H_2O$  за наступними параметрами: фракційний діапазон частинок – 0,16-2 мм, температура в реакційній зоні – 900-1150°C, концентрація кисню в суміші – 43-100%. Проведені дослідження показали наступне:

1. Заміна інертного газу в окисній атмосфері на  $H_2O$  призводить до інтенсифікації реакції та збільшення реакційної здатності палива. Експериментально встановлено, що відносна реакційна здатність графіту серед  $O_2/H_2O$  на 19% вище, ніж серед  $O_2/N_2$ .

2. Вплив концентрації  $O_2$  на питому швидкість згоряння в окислювальній суміші  $O_2/H_2O$  має лінійний характер і особливо сильно проявляється на фракціях менше 0,3 мм. На великих фракціях ( $> 1$  мм) воно слабо відчутно.

3. Режим горіння частинок графіту в середовищі  $O_2/H_2O$  в умовах експерименту, як і в середовищі  $O_2/N_2$ , був дифузійним або близьким до нього.

### Перелік використаних джерел:

- Jenkins R.G. Reactivity of heat-treated coals in air at 500°C / R.G. Jenkins, S.P. Nandi, P.L. Walker Jr. // Fuel. – 1973. – Vol. 52, iss. 4. – Pp. 288-293. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(73\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(73)90059-8).
- Linares-Solano A. Reactivity of heat-treated coals in steam / A. Linares-Solano, O.P. Mahajan, P.L. Walker Jr. // Fuel. – 1979. – Vol. 58, iss. 5. – Pp. 327-332. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(79\)90148-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(79)90148-0).

3. Hippo E. Reactivity of heat-treated coals in carbon dioxide 900°C / E. Hippo, P.L. Walker Jr. // *Fuel*. – 1975. – Vol. 54, iss. 4. – Pp. 245-248. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(75\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0016-2361(75)90037-X).
4. Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
5. Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments / P.A. Bejarano, Y.A. Levendis // *Combustion and Flame*. – Vol. 153, iss. 1-2. – 2008. – Pp. 270-287. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.10.022>.
6. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugar cane bagasse in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres / R. Khtami, C. Stivers, K. Joshi, Y.A. Levendis, A.F. Sarofim // *Combustion and Flame*. – Vol. 159, iss. 3. – 2012. – Pp. 1253-1271. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.009>.
7. Есин О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов: в 2 т. Часть 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами / О.А. Есин, П.В. Гельд. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 511 с.
8. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1958. – 600 с.
9. Хаджинов Е.А. Экспериментальное исследование кинетики сгорания одиночных угольных частиц / Е.А. Хаджинов, Б.И. Бондаренко // *Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ*. – Маріуполь, 2013. – Вип. 26. – С. 121-128. – (Серія : Технічні науки).

#### References:

1. Jenkins R.G., Nandi S.P., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in air at 500°C, *Fuel*, 1973, vol. 52, iss. 4, pp. 288-293. doi: 10.1016/0016-2361(73)90059-8.
2. Linares-Solano A., Mahajan O.P., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in steam. *Fuel*, 1979, vol. 58, iss. 5, pp. 327-332. doi: 10.1016/0016-2361(79)90148-0.
3. Hippo E., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in carbon dioxide 900°C. *Fuel*, 1975, vol. 54, iss. 4, pp. 245-248. doi: 10.1016/0016-2361(75)90037-X.
4. Babii V.I., Kuvaev Iu.F. *Gorenie ugol'noi pyli i raschet pyleugol'nogo fakela* [Combustion of coal dust and calculation of a pulverized coal flame]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p. (Rus.)
5. Bejarano P.A., Levendis Y.A. Single coal particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments. *Combustion and Flame*, vol. 153, iss. 1-2, 2008, pp. 270-287. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.10.022.
6. Khtami R., Stivers C., Joshi K., Levendis Y.A., Sarofim A.F. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugar cane bagasse in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres. *Combustion and Flame*, vol. 159, iss. 3, 2012, pp. 1253-1271. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.09.009.
7. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaiia khimiia pirometallurgicheskikh protsessov: v 2 t. Chast' 1. Reaktsii mezhdru gazoobraznymi i tverdymi fazami* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes: in 2 volumes. Part 1. Reactions between gaseous and solid phases]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1950. 511 p. (Rus.)
8. Kantorovich B.V. *Osnovy teorii goreniiia i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuels]. Moscow, Akademiia nauk SSSR Publ., 1958. 600 p. (Rus.)
9. Khadzhinov E.A., Bondarenko B.I. Eksperimental'noe issledovanie kinetiki sgoraniia odinocnykh ugol'nykh chastits [Experimental study of the kinetics of combustion of single coal particles]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriia : Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 26, pp. 121-128. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Стаття надійшла 19.10.2021