DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.4\(478\).1](https://doi.org/10.15589/znp2019.4(478).1)
УДК 66.03

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF FUEL FLOW RATE ON THE TEMPERATURE FIELDS OF A COAL PRODUCT BAKING FURNACE

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИТРАТИ ПАЛИВА НА ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ ПЕЧІ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Oleksii A. Zhuchenko

azhuch@ukr.net

ORCID: 0000-0001-5611-6529

Anton P. Korotynskyi

ORCID: 0000-0002-6309-5970

О. А. Жученко,

канд. техн. наук, доцент

А. П. Коротинський,

аспірант

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Kiev

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. Purpose. Developing a control system for baking carbon products involves controlling the temperature in the furnace by changing fuel flow rate. As it is precisely because of the violation of the temperature mode that the output of defective products is obtained, the study of the influence of the change in fuel flow rate on the temperature fields of the furnace chamber as one of the parameters of the technological mode is an important scientific and practical task.

Method. Due to the long duration and high energy consumption of the baking campaign, it is not possible to carry out research on industrial equipment, precisely because mathematical modeling was used as a research method. The study is a comparison of simulation results at different fuel flow rate, namely at 30 and 33 m³/h.

Results. The study of the influence of fuel flow rate on the temperature fields of the furnace chamber at the stage of the chamber "under fire" was conducted. The main focus of the study was on the uniformity of the temperature field of the blanks, which significantly affects their quality. The temperature fields of the chamber of the furnace and the blanks were constructed, on the basis of which the temperature differences in the blanks were analyzed, which significantly influence the quality of the original products. Histograms of the minimum and maximum temperatures at the end of the blanks for different modes of furnace operation are presented. The study found the dependence of the flue gas temperature on fuel flow rate. The results conclude that a change in fuel flow rate leads to significant changes in the temperature fields, which increases the value of the temperature drop across the entire furnace chamber. Conclusions have been made regarding the possibility of reducing the air flow rate for combustion.

Scientific novelty. The regularities of the change in the average value of the temperature drop across the blanks under different operating modes of the furnace have been revealed. The peculiarities of characteristic zones of the furnace during the process of heating the furnace chamber during the stage "under fire" are investigated.

Practical importance. The results obtained can be used in the development of updated regulations for baking carbon products in closed-type multi-chamber furnaces.

Key words: baking of carbon products; multi-chamber furnace; temperature fields; temperature difference; numerical modeling.

Анотація. Мета. Розробка системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів передбачає управління температурою в печі шляхом зміни витрати палива. Оскільки саме через порушення температурних режимів отримується вихід бракованої продукції, дослідження впливу зміни витрати палива на температурні поля камери печі як одного з параметрів технологічного режиму є важливою науковою та практичною задачею.

Методика. У зв'язку з тривалістю та високою енергозатратністю кампанії випалювання виконати дослідження на промисловому обладнанні неможливо, саме тому як метод дослідження використовувалося математичне моделювання. Дослідження відбувається як порівняння результатів моделювання за різних витрат палива, а саме за 30 та 33 м³/год.

Результати. Проведено дослідження впливу витрати палива на температурні поля камери печі на етапі камера «під вогнем». Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їхню якість. Побудовані температурні поля камери печі та заготовок, на підставі яких проаналізовані перепади температур по заготовках, що суттєво впливають на якість вихідної продукції. Представлені гістограми мінімальних і максимальних температур по заготовках наприкінці процесу для різних режимів роботи печі. Результатом дослідження стало виявлення залежності зміни температури димових газів

від витрати палива. З результатів зроблено висновок, що зміна витрати палива призводить до значних змін температурних полів, а саме збільшується значення перепаду температур по всьому об'єму камери печі. Зроблені висновки щодо можливості зменшення витрати повітря, що йде на горіння палива.

Наукова новизна. Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам за різних режимів роботи печі. Досліджено особливості характерних зон печі під час процесу нагрівання камери печі на етапі камера «під вогнем».

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для розроблення оновлених регламентів випалювання вуглецевих виробів у багатокамерних печах закритого типу.

Ключові слова: випалювання вуглецевих виробів; багатокамерна піч; температурні поля; перепад температур; чисельне моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Виробництво вуглеграфітових виробів загалом характеризується значним браком готової продукції при порушенні температурних обмежень під час обробки «зелених» заготовок у багатокамерних печах випалювання. Відтак проведення досліджень впливу основних технологічних параметрів, таких як витрата палива, надлишок витрати повітря, початкова температура повітря, рівень розрідження на перебіг кампанії випалювання, а точніше температурний режим, є важливою задачею для підвищення ефективності процесу випалювання загалом.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Забезпечення форми, цілісності, однорідності структури та необхідних фізико-механічних властивостей випаленого матеріалу залежить від температурного режиму нагріву заготовок в окремих інтервалах температур; рівномірності нагріву; схем завантаження заготовок у камери випалу й умов їх упаковки засипкою; швидкості охолодження обпалених заготовок (температури вивантаження заготовок із печі) [1].

У роботі [2] наведено вплив на процес випалювання та тепловий баланс камери виду наповнювача, його гранулометричного складу та поведінки сполучного матеріалу.

У роботі [3] з результатів експериментального дослідження газовиділення при різних швидкостях випалювання зразків промислових електродів отримані та проаналізовані залежності газовиділення від швидкості випалювання і температури.

Авторами [4] доведено, що при зниженні темпу випалювання пік газовиділення зміщується в область більш низьких температур, кількість виходу коксу зі сполучного збільшується. Рекомендований температурний інтервал зниження температури для досліджених електродів – 370...520°C.

У роботі [5] наведена методика для розробки модернізованого регламенту випалювання електродних виробів, що дозволяє забезпечити необхідну швидкість нагріву заготовки в інтервалі температури створення напівкоксу і узгодити мінімум швидкості зрос-

тання в заготовці з піком газовиділення. Нагрівання заготовок у печах здійснюється відповідно до температурних режимів.

У роботі [6] пропонується проводити процес випалювання з різними темпами підводу теплоти для відповідного діапазону температур.

Відповідно до роботи [7] видно, що кількість повітря, що подається на горіння, визначається переважно розрідженням на печі. Чим більше розрідження, тим більше надходить гарячого повітря, це обмежує можливість теплового режиму печі. На практиці зазвичай використовують інший спосіб ведення процесу випалювання, коли газ споживається одночасно двома-трьома поруч розташованими камерами. У цьому разі повітря на горіння в першу камеру надходить гарячим, а в другу-третю – холодний з атмосфери. Цей спосіб введення процесу випалювання приводить до зниження КПД печі на 10%.

Авторами [8] за допомогою експериментальних досліджень встановлено, що температура в газовому середовищі камери печі протягом процесу випалювання на 200–300°C вища за максимальну температуру заготовок.

На підставі отриманих експериментальних даних у праці [9] встановлено, що конструкція склепіння і муфельних каналів, схема завантаження печей і недосконалий технологічний регламент спричиняють значну нерівномірність температурного поля заготовок, samozапалення летких, неоднорідність фізичних властивостей випалених заготовок та ін., внаслідок чого вихід бракованих виробів може становити до 15–20%.

Результати експериментальних досліджень [10] свідчать, що максимальна температура електрода пропорційна температурі в газовому середовищі та не залежить від тривалості підйому температури; при випалюванні різницю максимально досягнутих температур у завантаженні становить 50–90°C, а різниця між максимальною температурою газового простору і температура в завантаженні – 250–350°C.

Проведений аналіз експериментальних даних [11–13] по дослідженню теплових процесів у печі для випалення заготовок із вуглеграфітових мате-

ріалів дозволяють зробити такі висновки: у всьому інтервалі температур випалу обмеженням процесу перенесення тепла є теплопередача через шар засипного матеріалу до заготовок, отже, піч для випалювання вуглеграфітових заготовок працює в т. зв. «кондуктивному» режимі і розташування заготовок у шарі засипки істотним чином впливає на швидкість і рівномірність їх нагрівання; розташування контейнера із заготовками в робочій камері обпалювальної печі не є раціональним, оскільки до його нижньої частини тепло практично не підводиться.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

З аналізу наявних сьогодні досліджень стає відомо, що автори не проводять декомпозиції кампанії випалювання на ключові етапи випалювання, а відтак і не проводять дослідження зв'язку температурних полів печі залежно від технологічних параметрів окремих етапів і їх раціонального використання для досягнення меншого виходу бракованої продукції протягом всієї кампанії випалювання.

Метою дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів є визначення впливу витрати палива на перепад температур по заготовкам і по камері печі загалом, на швидкість росту мінімальної та максимальної температур у заготовках, а також виявлення зон із мінімальними та максимальними температурами.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У зв'язку з тим, що виконати дослідження, задачі якого сформульовані вище, на промисловому обладнанні неможливо за технічних та економічних причин, як метод дослідження використовувалося математичне моделювання на основі моделі [14].

Процес випалювання вуглецевих виробів відбувається у багатокамерній кільцевій закритій печі випалювання типу Riedhammer [15–16]. Дослідження проводиться над камерою, у яку завантажено 5 заготовок діаметром 700 мм і висотою 2 100 мм. Тривалість випалювання 480 год, відповідно темп випалювання – 96 год, із яких 384 – підігрів димовими газами, а 96 – камера «під вогнем».

Прийнято, що початковий розподіл температур всіх складових частин камери печі відповідає кінцевому на етапі підігріву димовими газами. Температура повітря та природного газу приймається 300 К. Дослідження відбувається як порівняння результатів моделювання за різних витрат палива, а саме при 30 та 33 м³/год.

Для подальшого числового моделювання прийнято наведені в табл. 1–4 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [17–20]:

Таблиця 1. Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

T, К	ρ , кг/м ³	Ср, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	1 900	675	0,84
323	1 900	797	-
373	1 900	877	-
423	1 900	933	-
473	1 900	975	-
523	1 900	1 008	0,99
773	1 900	1 111	1,14
1 023	1 900	1 176	1,29
1 273	1 900	1 230	1,44
1 523	1 900	1 279	1,59

Таблиця 2. Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

T, К	ρ , кг/м ³	Ср, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	1 635	690	8
400	1 635	893	-
500	1 635	1 160	8,3
600	1 635	1 315	-
700	1 635	1 423	-
800	1 635	1 501	8,5
900	1 635	1 566	-
1 000	1 635	1 620	8,8
1 100	1 635	1 669	-
1 200	1 635	1 710	9,3
1 400	1 635	1 790	-

Таблиця 3. Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

T, К	ρ , кг/м ³	Ср, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	800	690	0,35
400	800	893	-
500	800	1 160	-
600	800	1 315	-
700	800	1 423	-
800	800	1 501	0,73
900	800	1 566	-
1 000	800	1 620	-
1 100	800	1 669	-
1 200	800	1 710	1,25
1 400	800	1 790	-

Таблиця 4. Теплофізичні властивості повітря

T, К	Ср, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	1 005	0,0244
373	1 009	0,0321
473	1 026	0,0393
573	1 047	0,046
673	1 068	0,0521
773	1 093	0,0574
873	1 114	0,0622
973	1 135	0,0671
1 073	1 156	0,0718
1 173	1 172	0,0763
1 273	1 185	0,0807
1 373	1 197	0,085
1 473	1 210	0,0915

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Шляхом чисельного моделювання отримані такі результати: максимальна температура факелу при 30 м³/год складає 1 651 К та 1 714 К при 33 м³/год, мінімальна температура холодної зони печі складає 747 К при 30 м³/год та 757 К при 33 м³/год. Відповідно перепад температур по всьому об'ємові касети складає 904 К і 957 К. Температура підсклепінчастої зони складає 1 425 та 1 475 К відповідно. Очевидно, значний вплив підсклепінчастої зони печі на температуру склепіння (див. рис. 1), що може спонукати до значного впливу цієї зони печі на температурні поля пересипки та заготовок відповідно.

Очевидним є той факт, що при збільшенні витрати природного газу, температури по всьому об'ємові касети збільшуються, а відповідно, і перепад температур.

Рис. 1. Температурні поля касети наприкінці етапу камера «під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Результати моделювання температурних полів пересипки показують, що максимальна температура зосереджена в гарячій області печі, де і відбувається горіння. Відповідно, максимальна температура цієї області при 30 м³/год складає 1 429 К та 1 482 К при 33 м³/год.

З результатів моделювання видно, що значення температур пересипки, яка знаходиться біля «підсклепінчастої зони» ближче до «холодної області печі», вище, ніж у протилежному кінці. Очевидно, це пояснюється особливістю рухів газів по газовому тракту печі.

Мінімальна температура холодної зони пересипки складає 950 К при 30 м³/год та 975 К при 33 м³/год. Відповідно, перепад температур по всьому об'ємові пересипки складає 479 К та 507 К.

Рис. 2. Температурні поля пересипки наприкінці етапу камера «під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

З результатів моделювання температурних полів заготовок на етапі камера «під вогнем» видно значний вплив гарячої та холодної зон печі. Видно значний вплив «підсклепінчастої зони» (див. рис. 3).

Рис. 3. Температурні поля заготовок наприкінці етапу «камера під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

На рис. 4–7 для більш повної характеристики уявлення про процес нагрівання заготовок при горінні палива представлені графіки зміни максимальних і мінімальних температур по кожній із заготовок при різних витраті палива.

Рис. 4. Графік зміни мінімальної температури по заготовкам при витраті палива 30 м³/год

Рис. 5. Графік зміни максимальної температури по заготовкам при витраті палива 30 м³/год

Рис. 6. Графік зміни мінімальної температури по заготовкам при витраті палива 33 м³/год

Рис. 7. Графік зміни максимальної температури по заготовкам при витраті палива 33 м³/год

а)

б)

Рис. 8. Гістограми мінімальних і максимальних значень температури по заготовкам наприкінці етапу камери «під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Рис. 9. Гістограма перепаду температур по заготовкам наприкінці етапу «камера під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Рис. 10. Графіки зміни максимальних і мінімальних температур по газовому середовищу наприкінці етапу камера «під вогнем»: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Рис. 11. Масова доля кисню: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Рис. 12. Масова частка CO₂: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

Рис. 13. Масова частка H₂O: а) – 30 м³/год, б) – 33 м³/год

На рис. 8 побудовано гістограми мінімальних і максимальних температур по всім заготовкам наприкінці етапу камера «під вогнем».

Відповідно до розрахунків видно, що при збільшенні витрати палива збільшується перепад температур по заготовкам, що ілюструється гістограмою 9.

При збільшенні витрати палива збільшується температура факелу та температура продуктів горіння на виході з камери печі, що йде на подальше нагрівання камери димовими газами. Графіки зміни максимальних і мінімальних температур по газовому середовищу наведено на рис. 10.

З результатів моделювання масових часток реагентів і продуктів реакції наприкінці етапу камера «під вогнем» впливає, що при збільшенні витрати природного газу вміст кисню на виході з камери печі зменшується. Масова доля кисню при витраті 30 м³/год складає 5%, а при 33 м³/год – 2%. Очевидно, що для витрати 30 м³/год витрата повітря 300 м³/год доволі мала.

Оскільки при витраті природного газу 33 м³/год в реакцію горіння вступає більше реагентів, то і вихід продуктів реакції у цьому разі буде більшим. З результатів моделювання отримано, що вихід CO₂ при витраті палива 30 м³/год складає 13%, а при 33 м³/год складає 15%, масова частка H₂O – 11% і 12% відповідно.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження виявило залежність зміни температури димових газів від витрати палива. Очевидним є те, що при меншій витраті палива температура димових газів на виході нижча, ніж при більшій витраті.

З результатів зроблено висновок, що зміна витрати палива призводить до значних змін температурних полів, а саме збільшується значення перепаду температур по всьому об'єму камери печі. Простежується значний вплив на перепад температури по заготовці № 1, що може мати негативні наслідки.

Зроблені висновки щодо можливості зменшення витрати повітря, яке йде на горіння палива.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження показали, що витрата палива має значний вплив на температурні поля печі випалювання. Збільшення витрати палива на 10% призводить до збільшення перепаду температури по заготовці 1 майже в три рази, а по іншим заготовкам орієнтовно – на 10–15%.

Збільшення витрати палива призводить до інтенсифікації процесу випалювання шляхом збільшення витрати димових газів і їх температур, які йдуть на попередній підігрів камер.

REFERENCES

- [1] Sannikov, A.K., Somov, A.B., Klyuchnikov, V.V. (1985). *Proizvodstvo elektrodnoy produktsii*. Moskva: Metallurgiya 129 s. [in Russian].
- [2] Pulnits, I.V. (2012). *Vliyanie tehnologicheskikh parametrov protsessa obzhiga na kachestvo uglegrafitovykh zagotovok* [The Influence of Technological Baking Process Parameters on Quality of Carbon and Graphite Blanks]. *Energotehnologii i resursosberezhenie*, no. 6, pp. 59–62. [in Ukrainian].

- [3] Shilovich, T.B., Sokolov, M.Yu. (2011). Issledovanie gazovyideleniya pri obzhige elektrodnoogo obraztsa [Study of gas evolution during firing of an electrode sample]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika*, no. 3, pp. 144–154. [in Ukrainian].
- [4] Panov, E.N., Shilovich, T.B., Leleka, S.V., Shilovich, Ya.I. (2011). Gazovyidelenie obraztsov elektrodnoy massyi pri termoobrabotke [Gas evolution of samples of electrode mass during heat treatment]. *Visnik NTUU KPI. Seriya Himichna inzheneriya, ekologiya ta resursoenergozberezhennya*, no. 1 (7), pp. 62–64. [in Ukrainian].
- [5] Karvatskiy, A.Ya., Leleka, S.V., Pulnits, I.V., Lazarev, T.V. (2011). Sovershenstvovanie reglamentov obzhiga s uchedom dinamiki gazovyideleniya obzhigaemykh zagotovok [Development of burning regulations take into account the dynamics of gas emission of burning blanks]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6/5 (54), pp. 42–45. [in Ukrainian].
- [6] Pulnits, I.V., Panov, E.N., Karvatskiy, A.Ya., Leleka, S.V., Lazarev, T.V., Chirka, T.V. (2014). Teploobmen v mnogokamernykh pechakh obzhiga uglegrafitovykh izdeliy [Heat transfer in multi-chamber furnaces for firing carbon-graphite products]. *Kiev: NTUU KPI*. 175 s. [in Ukrainian].
- [7] Chalyih, E.F., Paschenkova, L.F. (1983). Pechi elektrodnykh zavodov [Furnaces of electrode plants]. *Moskva: MHTI im. D.I. Mendeleeva*. 76 s. [in Russian].
- [8] Fokin, V.P., Malahov, A.A., Malahov, S.A., Soshkin, C.B. (2002) Usovershenstvovanie tehnologii obzhiga elektrodnykh materialov [Improving the technology of firing electrode materials]. *Tsvetnyye metally*, no. 4, pp. 48–52. [in Russian]
- [9] Pulnits, I.V. (2013). Pidvischennya efektyvnosti roboti pechey vipalu vuglegrafitovykh virobiv [The efficiency of the robots of the vipalu furnaces in the graphite and viral furnaces]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.17.08. Kiyiv. 20 s. [in Ukrainian].
- [10] Soshkin, G.S. (2012). Issledovanie protsessu obzhiga elektrodnoy produktsii v mnogokamernykh pechakh i razrabotka sistemy upravleniya tehnologicheskim rezhimom [Investigation of the process of roasting electrode products in multi-chamber furnaces and the development of a process control system]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.06. Vladikavkaz. 24 s. [in Russian].
- [11] Shibakov, S.N. (2004). Sovershenstvovanie teplovykh protsessov s tselyu povyisheniya kachestva obzhiga zagotovok iz uglerodistykh materialov [Improving thermal processes in order to improve the quality of firing blanks from carbon materials]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.16.02. Moskva. 36 s. [in Russian].
- [12] Molokova, T.L., Harlampov, G.Zh., Suhorukov, I.F. (1977). Issledovanie obzhiga uglegrafitovykh zagotovok [Investigation of the burning of carbon blanks]. *Himiya tverdogo topliva*, no 6, pp. 114–120. [in Russian].
- [13] Fialkov A.S. Uglegrafitovyye materialy [Carbon materials]. *Moskva: Energiya*, 1979. 320 s. [in Russian].
- [14] Smirnova, A.S., Ryss, M.A., Dmizhrieva, G.V., Bazhenov, N.A. (1965). Izuchenie dinamiki gazovyideleniya i izmeneniya svoystv pri obzhige zagotovok, izgotovlennykh na sredne- i vysokotemperaturnom pechakh [The study of the dynamics of gas evolution and changes in properties during the firing of billets made on medium and high temperature furnaces]. *Tsvetnyye metally*, no. 11, pp. 90–93. [in Russian].
- [15] Lutkov, A.I. (1990). Teplovyie i elektricheskie svoystva uglerodnykh materialov [Thermal and electrical properties of carbon materials]. *Moskva: Metallurgiya*. 175 s. [in Russian].
- [16] Shvartsberg, M.B. (1938). Ugolnyie i grafitovyye elektrody dlya elektropechey i elektrolizerov [Carbon and graphite electrodes for electric furnaces and electrolyzers]. (Sistematicheskoe sobranie patentov, sost.). L., M.: GONTI NKTP Gl. red. tsvetnoymetallurgii. 407 s.
- [17] Levchenko, P.V. (1968). Raschet pechey i sushil silikatnoy promyshlennosti [Calculation of furnaces and dried silicate industry]. *Moskva: Vysshayashkola*. 363 s. [in Russian].
- [18] Karvatskiy, A.Ya., Pulnits, I.V., Shilovich, I.L. (2012). Matematichna model teplogidrodinamichnogo stanu bagatokamernoy pechi pri vipalyuvanni elektrodnykh zagotovok [Mathematical model of heat-hydrodynamic state of the multichamber furnace during the baking of electrode blanks]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 1/4 (55), pp. 33–37. [in Ukrainian].
- [19] Sannikov, A.K., Somov, A.K., Klyuchnikov, V.V. (1985). Proizvodstvo elektrodnoy produktsii [Production of electrode products]. *Moskva: Metallurgiya*, 129 s. [in Russian].
- [20] Chalyih, U.F. (1990). Oborudovanie elektrodnykh zavodov [Equipment for electrode plants]. *Moskva: Metallurgiya*. 235 s. [in Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Санников, А.К., Сомов, А.Б., Ключников, В.В. (1985). Производство электродной продукции. Москва : Metallurgiya. 129 с.
- [2] Пулинец, И.В. (2012). Влияние технологических параметров процесса обжига на качество угляграфитовых заготовок. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. № 6. С. 59–62.
- [3] Шилович, Т.Б., Соколов, М.Ю. (2011). Исследование газовыделения при обжиге электродного образца. *Металлургическая теплотехника*. № 3. С. 144–154.
- [4] Панов, Е.Н., Шилович, Т.Б., Лелека, С.В., Шилович, Я.И. (2011). Газовыделение образцов электродной массы при термообработке. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсоенергозбереження»*. № 1 (7). С. 62–64.
- [5] Карвацкий, А.Я., Лелека, С.В., Пулинец, И.В., Лазарев, Т.В. (2011). Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовыделения обжигаемых заготовок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 6/5 (54). С. 42–45.

- [6] Пулинец, И.В., Панов, Е.Н., Карвацкий, А.Я., Лелека, С.В., Лазарев, Т.В., Чирка, Т.В. (2014). Теплообмен в многокамерных печах обжига углеродистых изделий. Киев : НТУУ «КПИ». 175 с.
- [7] Чалых, Е.Ф., Пашенкова, Л.Ф. (1983). Печи электродных заводов. Москва : МХТИ им. Д.И.Менделеева. 76 с.
- [8] Фокин, В.П., Малахов, А.А., Малахов, С.А., Сошкин, С.В. (2002). Усовершенствование технологии обжига электродных материалов. *Цветные металлы*. № 4. С. 48–52.
- [9] Пулінець, І.В. (2013). Підвищення ефективності роботи печей випалу вуглеграфітових виробів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. Київ. 20 с.
- [10] Сошкин, Г.С. (2012). Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы управления технологическим режимом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Владикавказ. 24 с.
- [11] Шибалов, С.Н. (2004). Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеродистых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02. Москва. 36 с.
- [12] Молокова, Т.Л., Харламповин, Г.Ж., Сухорукое, И.Ф. (1977). Исследование обжига углеродистых заготовок. *Химия твердого топлива*. № 6. С. 114–120.
- [13] Фиалков А.С. Углеродистые материалы. Москва : Энергия, 1979. 320 с.
- [14] Смирнова, А.С., Рысс, М.А., Дмижриева, Г.В., Баженов, Н.А. (1965). Изучение динамики газовой выделенности и изменения свойств при обжиге заготовок, изготовленных на средне- и высокотемпературном печах. *Цветные металлы*. № 11. С. 90–93.
- [15] Лутков, А.И. (1990). Тепловые и электрические свойства углеродных материалов. Москва : Металлургия. 175 с.
- [16] Шварцберг, М.Б. (1938). Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров. (Систематическое собрание патентов, сост.). Ленинград, Москва : ГОНТИ НКТП Гл. ред. цветной металлургии. 407 с.
- [17] Левченко, П.В. (1968). Расчет печей и сушил силикатной промышленности. Москва : Высшая школа. 363 с.
- [18] Карвацкий, А.Я., Пулінець, І.В., Шилович, І.Л. (2012). Математична модель теплогідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 1 (4). С. 33–37.
- [19] Санников, А.К., Сомов, А.К., Ключников, В.В. (1985). Производство электродной продукции. Москва : Металлургия. 129 с.
- [20] Чалых, У.Ф. (1990). Оборудование электродных заводов. Москва : Металлургия. 235 с.