

І. А. НАЗАРЕНКО, О. А. ПЕТРИК, А. А. КУЗЬМЕНКО, Р. О. ЖУКОВ

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ АГРЕГАТІВ НА ОСНОВІ РОЗРОБКИ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ РОЗІГРІВАННЯ

У даній статті розглянуто вдосконалення теплових режимів розігрівання високотемпературного агрегату, що дозволить підвищити ефективність технологічного процесу та сприятиме зниженню витрат. Тема дослідження режимів розігрівання високотемпературних агрегатів є актуальною в контексті підвищення ефективності виробництва металевих виробів та зменшення затрат на виробництво. Виконано розрахунок теплового балансу нагрівання склепіння високотемпературного агрегату. На підставі отриманих результатів і наявності надлишку теплоти в прибутковій частині розрахунковим шляхом виконано підбір тривалості й витрат палива для нового графіку. На основі проведених досліджень розроблено нові раціональні графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату в залежності від тривалості графіку та обсягу виконаних робіт, що дозволило знизити витрати палива на нагрівання на 10,7 % – 12 %, а також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим. Отримані результати можуть бути використані в промисловості для підвищення енергетичної ефективності процесу виробництва металевих виробів та зниження собівартості продукції.

Ключові слова: вдосконалення, режими нагрівання металу, високотемпературні агрегати, якість продукції, температура нагрівання, швидкість нагріву, теплові режими, нагрівальні колодці, енергоефективність, тепловий потік.

I. NAZARENKO, A. PETRYK, A. KUZMENKO, R. ZHUKOV

WAYS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE UNITS BASED ON THE DEVELOPMENT OF RATIONAL THERMAL HEATING MODES

This article considers the improvement of thermal modes of heating of a high-temperature unit, which will allow to increase the efficiency of the technological process and contribute to reducing costs. The topic of studying the modes of heating of high-temperature units is relevant in the context of increasing the efficiency of the production of metal products and reducing production costs. The heat balance of heating the vault of a high-temperature unit was calculated. Based on the results obtained and the presence of excess heat in the profit part, the duration and fuel consumption for a new schedule were selected by calculation. Based on the research conducted, new rational schedules of heating the vault of a high-temperature unit were developed depending on the duration of the schedule and the amount of work performed, which allowed to reduce fuel consumption for heating by 10.7 %–12 %, as well as increase the productivity of the unit due to the sooner entry into operating mode. The results obtained can be used in industry to increase the energy efficiency of the process of manufacturing metal products and reduce the cost of products.

Key words: improvement, metal heating modes, high-temperature units, product quality, heating temperature, heating speed, thermal modes, heating pads, energy efficiency, heat flow.

Вступ

Високотемпературні агрегати є одними з найбільших споживачів палива. Теплотехнологічна установка, являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію. Витрати палива для нагрівання металу у високотемпературних нагрівальних колодцях та витратний коефіцієнт, яких підраховується після проходження прокатного переділу є однією з складових собівартості виробництва сталі [1].

Теплотехнологічна установка (під-агрегат), являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію [2].

Верхня частина огороження реактора (робочого простору) називається склепінням. Склепіння – це елемент, що визначає стійкість агрегату загалом і впливає на техніко-економічні показники виробництва.

На печах з інтенсивним продуванням ванни киснем стійкість склепіння становить близько 250 плавов і більше. У процесі плавки на склепіння

печі впливають як нерівномірність нагрівання внутрішньої поверхні склепіння по довжині та ширині так показники нерівномірності температурного поля факела при розігріванні агрегату. Також велику увагу треба приділити складу вогнетривких матеріалів, з яких зроблено склепіння та основні елементи футерування високотемпературних агрегатів.

Слід зауважити, що на енергоощадну роботу високотемпературного агрегату впливає ритмічність його роботи. Від того, наскільки якісно було виконано розігрівання склепіння високотемпературного агрегату після пуску його в роботу залежить подальша ритмічність його роботи та відповідно витрати палива на технологію та експлуатацію.

Тому питанню якісного розігрівання склепіння агрегату треба приділяти особливу увагу.

Розглянемо схему потоків теплоти у високотемпературному агрегаті при розігріві високотемпературного агрегату (рис. 1).

Тепловий баланс буде мати вигляд [2]:

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{втр}}, \quad (1)$$

Прихід теплоти до поверхні нагріву розраховується за такою формулою:

де $M_{\text{прих}} = M_{\text{Хім.т}} + M_{\text{Фіз.т}} + M_{\text{Фіз.пов}}$ (2)
 $M_{\text{Хім.т}}$ – хімічна теплота палива, ГДж;
 $M_{\text{Фіз.т}}$ – фізична теплота палива, ГДж;
 $M_{\text{Фіз.пов}}$ – фізична теплота повітря, яке надійшло на горіння, ГДж.

Витрати теплоти розраховуються за формулою:

$M_{\text{витр}} = M_{\text{нагрів}} + M_{\text{відх}} + M_{\text{охол.к}} + M_{\text{охол.ш}} + M_{\text{ок}} + M_{\text{випром}} + M_{\text{виб.г}} + M_{\text{підсм}}$ (3)
де $M_{\text{нагрів}}$ – витрати теплоти на нагрів склепіння, ГДж;

$M_{\text{відх}}$ – витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, ГДж;

$M_{\text{охол.к}}$ – витрати теплоти на охолодження кришок завалочних вікон, ГДж;

$M_{\text{охол.ш}}$ – витрати теплоти на охолодження шибєрів, ГДж;

$M_{\text{ок}}$ – витрати теплоти через огорожувальні конструкції, ГДж;

$M_{\text{випром}}$ – витрати теплоти випромінюванням через відчинені вікна й гляділки, ГДж;

$M_{\text{виб.г}}$ – витрати теплоти з газами, що вибиваються, ГДж;

$M_{\text{підсм}}$ – витрати теплоти від холодного повітря, що підсмоктується в піч, ГДж.

Мета роботи

Метою дослідження є вдосконалення теплових режимів розігрівання високотемпературного агрегату, що дозволить підвищити ефективність технологічного процесу, уникнути нерівномірності

нагрівання внутрішньої поверхні склепіння по довжині та ширині внаслідок зміни температурних градієнтів поля факела та зниження витрат палива на технологію.

Виклад основного матеріалу

Виконано розрахунок теплового балансу при розігріванні склепіння високотемпературних агрегатів за наступних умов: тривалі простої та виконання підвищеного обсягу виконання ремонтних робіт (у тому числі проведення заміни димовідводячого тракту). Відповідно до класичного графіку розігрівання [3], [4] і методики [2] відзначимо присутність профіциту теплоти. На підставі отриманих результатів і наявності надлишку теплоти в прибутковій частині розрахунковим шляхом виконаємо підбір тривалості й витрат палива для нового графіку (нового теплового режиму). Результати розрахунків зведено в табл. 1, 2. Витратна частина теплового балансу високотемпературного агрегату за класичною технологією розігрівання та новим режимом зображена на рис. 1.

Таким чином, нев'язка балансу за класичним графіком нагрівання склала 10,37 %, а за запропонованим 0,7 %.

Слід зазначити, що у пічній системі, витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, складаються з фізичної теплоти гарячих газів, що відходять, та їх об'єму [2]. При цьому на них має істотний вплив швидкість газів, що відходять.

Таблиця 1 – Приходна частина теплового балансу

Прихід теплоти	Класичний графік нагрівання 72 год		Запропонований графік нагрівання 67 год	
	ГДж	%	ГДж	%
1 Хімічна теплота палива	3920,9	92,84	3327,3	92,21
2 Фізична теплота палива	3,6	0,086	3,1	0,085
3 Фізична теплота повітря на горіння	298,7	7,07	277,9	7,70
4 Загальний прихід теплоти	4223,2	100	3608,3	100

Таблиця 2 – Витратна частина теплового балансу

Витрата тепла	Класичний графік нагрівання 72 год		Запропонований графік нагрівання 67 год	
	ГДж	%	ГДж	%
1 На нагрів склепіння	559,3	14,78	559,3	15,61
2 З газами, що відходять	2375,8	62,77	2002,0	55,88
3 На охолодження кришок	150,8	3,99	140,4	3,92
4 На охолодження шибєрів	54,3	1,43	50,5	1,41
5 Через огорожувальні конструкції	469,9	12,41	444,3	12,40
6 Випромінюванням	9,3	0,25	9,0	0,25
7 З газами, що вибиваються	117,6	3,11	332,7	9,29
8 Від холодного повітря	47,9	1,27	44,6	1,24
9 Сумарні теплові витрати	3785,0	100	3582,9	100

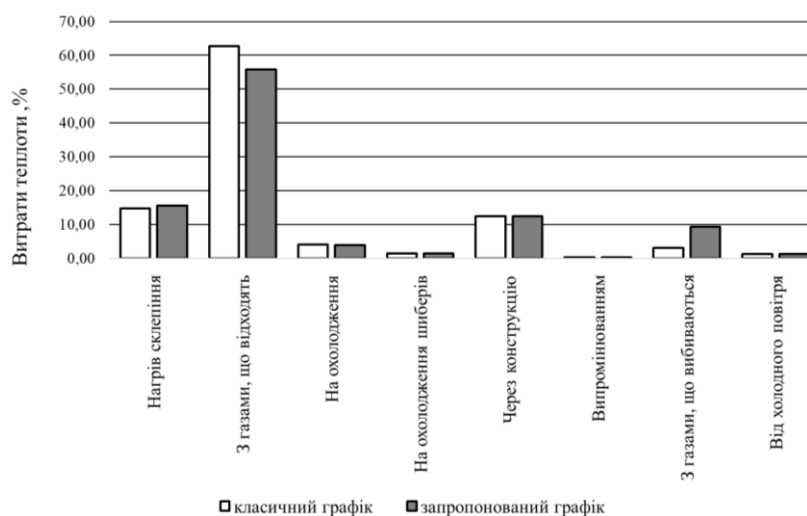


Рис. 1 – Витратна частина теплового балансу високотемпературного агрегату за класичною технологією розігрівання та новим режимом

Щоб мати змогу знизити витрати палива при розігріванні високотемпературного агрегату, треба знизити втрати теплоти з димовими газами, що відходять. Одним із шляхів є зменшення швидкості продуктів згоряння шляхом зменшення розрідження (на 20 % – 25 %) в димовому тракті (газів, що йдуть на димову трубу), за допомогою керування системою димових шибєрів.

Оцінка надлишку теплоти проводиться по наступній формулі [2], [5], [6]:

$$\Delta H = (M_{\text{вигр}} - (M_{\text{вигр}} - M_{\text{прих}})) / M_{\text{прих}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

При аналізі результатів, отриманих при розрахунках теплового балансу, слід враховувати, що при $\Delta H > 0$ – є присутній надлишок прибуткової частини теплоти, тобто в агрегат вноситься більше теплоти, ніж споживається, що у свою чергу йде на збільшення втрат; при $\Delta H < 0$ – в агрегат вноситься менше теплоти, ніж необхідно для забезпечення нормальної теплової роботи агрегату (агрегат працює з недоліком теплоти), що у свою чергу призводить до неякісного прогрівання склепіння. Найбільш раціонально розраховувати тепловий баланс плавки з надлишком теплоти в діапазоні до 1 % [4].

Виконано порівняльний аналіз розігрівання дослідного та базового варіантів режимів розігрівання. З аналізу встановлене наступне:

- тривалість розігрівання знижено на 5 годин або на 6,9 % (з 72 до 67 годин);
- витрати палива знижено на 594,1 ГДж або 15,1 % (з 3924,5 до 3330,4 ГДж);
- втрати теплоти з газами, що відходять, знижено на 373,8 ГДж або 15,7 % (з 2378,8 до 2002,0 ГДж).

При цьому нев'язку по балансу знижено на 9,67 % (з 10,37 до 0,7 %).

Дані табл. 1, 2 свідчать про суттєве покращення показників нагрівання агрегату: зростає

частка корисно використаного тепла, а витрати палива зменшуються.

Отримані результати дозволяють впритул підійти до питання побудови нового раціонального графіка розігрівання склепіння високотемпературного агрегату. Що дозволить знизити витрати палива на нагрівання, а також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим.

Згідно [2] розігрівання сталеплавильних печей після повної заміни склепіння та виконання додаткових робіт з димовідвідним трактом здійснюється за 72-годинними графіками. Швидкість розігрівання при постійній подачі палива складає 45 °C/год – 70 °C/год. Підймання температури склепіння здійснюється безперервно та без температурних витримок, що не враховує виникаючі в процесі розігрівання внутрішні механічні напруження вогнетривких матеріалів, що виникають внаслідок підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромтових вогнетривких виробів, пов'язаних з їх перекристалізацією в інтервалах 300 °C – 350 °C і 800 °C – 850 °C, що може призвести до утворення тріщин і, як наслідок, сколу склепіння в процесі подальшої експлуатації, зниження стійкості головного склепіння.

На основі розрахунків, в основі яких лежать рівняння теплового балансу високотемпературного агрегату [3], а також рекомендації [7] – [9] щодо розігріву вогнетривких виробів, розроблено новий раціональний режим розігрівання. Графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією [2] та запропонований приведено на рис. 2.

Згідно запропонованого температурного режиму швидкість розігрівання при диференціальній подачі палива складає: з 1 по 16 годину –

16 °C/год, витримка при температурі 310 °C (тривалістю 3 години), з 20 по 41 годину – 25 °C/год, витримка при температурі 810 °C (тривалістю 3 години), з 44 до 67 години – 35 °C/год. За розрахунками теплового балансу, кількість теплоти, що необхідно підвести до склепіння, щоб його нагріти складає:

- за класичною технологією – 14 ГДж/м²,
- за новою технологією – 11,9 ГДж/м² (зниження на 2,1 ГДж/м² або 15,1 %).

Новий тепловий режим розігріву склепіння печі дозволить забезпечити рівномірний температурний градієнт по всій поверхні склепіння, а та-

кож простору печі: з витримкою на 310 °C і 810 °C в зонах підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромітових виробів. При цьому зниження палива складає 15,1 %.

Аналогічно можна виконувати розрахунки та розробляти нові раціональні режими розігрівання за різних обсягів виконання ремонтних робіт, наприклад, для графіка з підвищеним обсягом ремонтних робіт тривалістю 80 годин і більше.

Графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією [2] та запропонований приведено на рис. 2.

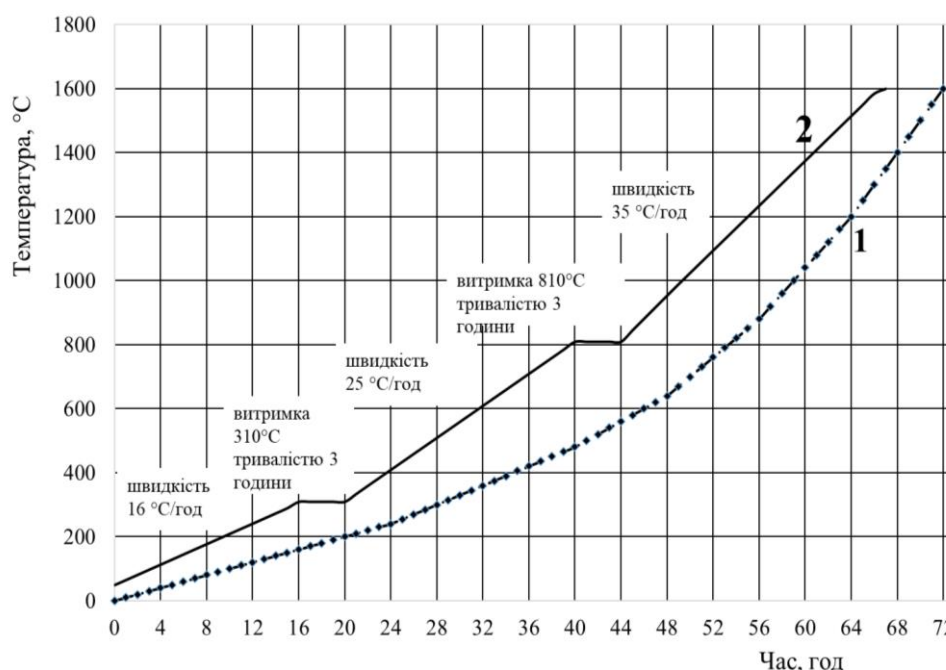


Рис. 2 – Графік розігрівання склепіння високотемпературного агрегату при підвищеному обсязі виконання ремонтних робіт: 1 – за класичною технологією; 2 – запропонований

Обговорення результатів

Виконаний порівняльний аналіз розігрівання дослідного та базового варіантів режимів розігрівання. З аналізу встановлене наступне:

- тривалість розігрівання знижено на 5 годин або на 6,9 % (з 72 до 67 годин);
- витрати палива знижено на 594,1 ГДж або 15,1 % (з 3924,5 до 3330,4 ГДж);
- втрати теплоти з газами, що відходять, знижено на 373,8 ГДж або 15,7 % (з 2378,8 до 2002,0 ГДж).

При цьому нев'язку по балансу знижено на 9,67 % (з 10,37 % до 0,7 %).

Отримані результати дозволили розробити нові раціональні графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату, що дозволило знизити витрати палива на нагрівання на 15,1 %, а

також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим.

Згідно запропонованого температурного режиму швидкість розігрівання при диференціальній подачі палива зміниться в залежності від тривалості графіку та обсягу виконаних робіт та буде коливатися від 16 °C/год до 35 °C/год.

Висновки

Виконано розрахунок теплового балансу нагрівання склепіння високотемпературного агрегату. На підставі отриманих результатів і наявності надлишку теплоти в прибутковій частині розрахунковим шляхом виконано підбір тривалості й витрат палива для нового графіку.

На основі проведених досліджень розроблено новий раціональний графік розігрівання склепіння високотемпературного агрегату в залежності від

тривалості графіку та обсягу виконаних робіт, що дозволило знизити витрати палива на нагрівання більш ніж на 15 %, а також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим.

Список літератури

1. Петрик О. А. Підвищення ефективності нагрівання металу у високотемпературних агрегатах / О. А. Петрик, І. А. Назаренко, Б. В. Петрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2023. – № 1–2(13–14). – С. 61–65. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.01.10>.
2. Губінський В. І. Металургійні печі : навч. посібн / В. І. Губінський. – Дніпро : НМетАУ, 2006. – 85 с.
3. Сушіння та спікання футерування печей для плавки чорних металів / Termolit PLUS. – Назва з екрану. – URL: <https://termolitplus.com/articles/sushka-i-spekanie-futerovki-pechey/#> (дата звернення 22.12.2024).
4. Смирнов А. н. Підвищення стійкості футерування та вдосконалення методів обслуговування сучасних великовантажних конвертерів / А. н. Смирнов, О. А. Сердюков, А. Ф. Тонкушин, До. н. Шарандін // Бюлетень науково-технічної та економічної інформації. Чорна металургія, №6, 2012. – С. 26–30.
5. Сущенко А. В. Сравнительный анализ методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки / А. В. Сущенко, И. А. Фейерштейн // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – Вип. 27. – С. 17–29. – ISSN 2225-6733 (print). – ISSN 2519-271X (on-line).
6. Ревун М. П. Математическое моделирование нагрева металла в печи (сообщение 2) / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов // Металургія. – Запоріжжя : ЗДІА, 2011. – № 23. – С. 163–171. – ISSN 2071-3789 (print).
7. Губінський В. І. Нагрівальні печі металургії – сьогодні та завтра / В. І. Губінський // Теорія і практика металургії. – 2004. – № 6. – С. 56–60. – ISSN 1028-2335 (print).
8. Спосіб керування тепловим режимом сталеплавильної печі : Патент на корисну модель № 20930 : Україна, МПК F27B3/20 / Риженков О. М., Крикунов Б. П., Петров Ю. В., Богославський Ю. А., Петрова М. Г., Яковенко А. Т. ; Заявитель и патентообладатель ЗАТ «ДОНЕЦЬКСТАЛЬ» – МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД». – № u200609712 ; заявл. 11.09.2006 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2. – 4 с. – URL: <https://iprop-ua.com/inv/xhw4bikn/> (дата звернення 22.12.2024).
9. Терещенко М. О. Вогнетривких матеріалів промисловість / М. О. Терещенко, А. М. Горський // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН Укра-

їни, 2005. – URL: <https://esu.com.ua/article-35277> (дата звернення 22.12.2024).

References (transliterated)

1. Petrik A., Nazarenko I., Petrik B. (2023), “Increasing the Metal Heating Efficiency in High-Temperature Units”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1–2(13–14), pp. 61–65, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.01.10>.
2. Gubinskiy, V. I. (2006), *Metalurgijni pechi* [Metallurgical furnaces], NMetAU, Dnepr, 85 p.
3. Termolit PLUS (2024), *Sushinnya ta spikannya futeruvannya pechey dlya plavky chornykh metaliv* [Drying and Sintering of Acidic Lining of Induction Furnaces for Melting Ferrous Metals], Access mode: <https://termolitplus.com/articles/sushka-i-spekanie-futerovki-pechey/#> (accessed 22 December 2024).
4. Smirnov, A. N. (2012) “Pidvyshchennya stiykosti futeruvannya ta vdoskonalennya metodiv obsluhovuvannya suchasnykh velykovantaznykh konverteriv” [Improvement of lining durability and advanced maintenance methods for current high-voltage converters], *Bulletin of scientific, technical and economic information. Black metallurgy*, vol. 6, 2012. – pp. 26–30 (print).
5. Sushchenko A. V., Fieiereizen I. O. (2013), “Sravnitel'nyy analiz metodik rascheta material'nogo i teplovogo balansov kislorodno-konverternoy plavki [Comparative analysis of methods for calculation of material and thermal balances of oxygen-converter melting]”, *Reporter of the Priazovskiy state technical university*, vol. 27, pp. 17–29, ISSN 2225-6733 (print), ISSN 2519-271X (on-line).
6. Revun, M. P., Kayukov Yu., Cheprasov, A., Ivanov V. (2011), “Matematicheskoe modelirovanie nagreva metalla v pechi (soobshhenie 2) [Mathematical modeling of metal heating in a furnace (message 2)]”, *Scientific Journal “Metallurgy”*, vol. 23, pp. 163–171, ISSN 2071-3789 (print).
7. Gubinskiy, V. I. (2004), “Nagrevatel'nye pechi metallurgii – segodnja i zavtra [Heating furnaces of metallurgy – today and tomorrow]”, *Theory and practice of metallurgy*, vol. 6, pp. 56–60, ISSN 1028-2335 (print).
8. Ryzhenkov O. M., Krykunov B. P., Petrov Ju. V., Bogoslavskiy Ju. A., Petrova M. G., Jakovenko A. T., ZAT “DONECKSTAL” – METALURGIJNYJ ZAVOD” (2007), *Sposib keruvannya teplovym rezhymom staleplavyl'noi' pechi* [The method of controlling the thermal regime of the steel-melting furnace], Kiev, Ukraine, Pat. No. 20930, Access mode: <https://iprop-ua.com/inv/xhw4bikn/> (accessed 22 December 2024).
9. Tereshchenko M. O., Horskyi A. M. (2005), “Vohnetryvkykh materialiv promyslovist [Refractory materials industry]”, *Encyclopedia of Modern Ukraine*, The NASU institute of Encyclopedic Research, Kyiv, Access mode: <https://esu.com.ua/article-35277> (accessed 22 December 2024).

Надійшла (received) 18.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Назаренко Ірина Анатоліївна (Nazarenko Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, Національного університету «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних машин, м. Запоріжжя; тел.: (099) 704–96–36; e-mail: irinan842@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424>.

Петрик Олексій Анатолійович (Petryk Oleksiy) – кандидат технічних наук, доцент, Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя; тел.: (050) 418–45–31; e-mail: iternel17@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6287>.

Кузьменко Алла Анатоліївна (Kuzmenko Alla) – старший викладач Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя; тел.: (050) 451–60–50; e-mail: kaa1930kaa@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-535X>.

Жуков Роман Олегович (Zhukov Roman) – аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя; тел.: (066) 559–71–70; e-mail: r.o.zhukov.rz@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9944-3486>.