

Гладких В.А., Рубан А.В., Кузьменко С.М., Рябцев О.О., Аносов О.В., Кравченко В.П.
Визначення часу транспортного запізнення шихти при виплавці марганцевих сплавів у надпотужних феросплавних електропечах

Gladkikh V.A., Ruban A.V., Kuzmenko S.M., Riabtsev O.O., Anosov O.V., Kravchenko V.P.
Determination of the charge transport delay time during the smelting of manganese alloys in high-power ferroalloy electric furnaces

Покращення техніко-економічних показників процесу виплавки феросплавів відбувається за рахунок вирішення питань оперативного керування технологічними процесами, а їх оптимізація пов'язана з використанням надійних практичних вихідних даних. Тому в роботі з метою встановлення кореляційних взаємозв'язків між вихідними параметрами і кінцевими показниками з урахуванням технологічної інерційності процесу запропоновано скореговану методику «транспортного запізнення». Експериментально встановлено час «транспортного запізнення» електропечі РПЗ-63. Практична значущість результатів полягає в отриманні більш достовірних промислових даних залежності впливу опору електрода (R_3) на продуктивність печі (Π_n), питомі витрати електричної енергії (Q_n) та коефіцієнт вилучення марганцю у сплав (η_{Mn}).

Ключові слова: феросплави, марганець, шихта, РПЗ-63, «транспортне запізнення», промисловий експеримент, регресійний аналіз, ТЕП.

Improvement of technical and economic indicators of the smelting process of ferroalloys occurs by solving issues of operational control of technological processes, and their optimization is associated with the use of reliable practical initial data. Therefore, in the work, in order to establish correlations between the initial parameters and final indicators, taking into account the technological inertia of the process, an adjusted "transport delay" method is proposed. The "transport delay" time of the RPZ-63 electric furnace was experimentally determined. The practical significance of the results lies in obtaining more reliable industrial data on the dependence of the influence of the electrode resistance on the furnace productivity, specific electrical energy consumption and the manganese extraction coefficient in the alloy.

Keywords: ferroalloys, manganese, charge, RPZ-63, "transport delay", industrial experiment, regression analysis, TEP.

Вступ. Інтенсифікація електротермічних процесів виробництва марганцевих феросплавів в рудновідновлювальних надпотужних феросплавних електропечах типу РПЗ-63 пов'язана з розробкою нових і удосконаленням діючих технологій. Покращення техніко-економічних показників і підвищення якості готової продукції в умовах використання різноманітної марганцеворудної сировини і власних відходів вирішується на базі впровадження автоматизованих систем управління окремими ланцюгами і технологічним процесом в цілому [1-4]. Суттєве значення при цьому набувають рішення з використанням комп'ютерних технологій з дослідженням, моделюванням і керуванням процесами виробництва марганцевих феросплавів [5-8]. Вирішення питань оперативного керування технологічними процесами і їх оптимізації пов'язане з використанням надійних практичних вихідних даних.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Безперервний вуглецевотермічний процес виплавки марганцевих феросплавів в потужних закритих і герметичних рудновідновлювальних електропечах супроводжується безперервним завантаженням шихтових матеріалів на колошник печі. Для виключення виходу феросплавного газу через пічні бункери в них постійно повинен підтримуватись потрібний рівень і відповідна маса шихти.

В ванні феросплавної печі типу РПЗ-63 знаходиться біля 300 т. шихти [9-12].

Відновлювальні процеси та формування шлаку і металу відбувається в приелектродних зонах і на подині. В середньому через 2,66 години продукти плавки випускають із печі. Хімічний склад вихідних шихтових матеріалів контролюють один раз за зміну. В плавильному журналі фіксується також маса кожного витраченого за робочу зміну шихтового компонента. Хімічний склад феросплаву, шлаку і їх маса контролюються по-плавочно. При складанні матеріального балансу виплавки феросплаву на виробництві використовується методика узагальнення показників за добу і в цілому за виділений період часу.

Для періодичних вуглецевідновлювальних процесів при такому підході і за часом початок змінення складу шихти відповідає новому складу отриманого феросплаву в період плавки. Проте, потужні рудновідновлювальні печі, які працюють безперервним процесом, мають велику глибину ванни (до 5 м). Саме в таких печах і відбувається «транспортне запізнення» між початком завантаження зміненого складу шихти і початком отримання феросплаву нового хімічного складу, який відповідає цій шихті.

© Гладких В.А. – к.т.н., доц. УДУНТ
 Рубан А.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
 Кузьменко С.М. – аспірант УДУНТ
 Рябцев О.О. – аспірант УДУНТ
 Аносов О.В. – аспірант УДУНТ
 Кравченко В.П. – аспірант УДУНТ

Gladkikh V. – c.t.s., docent USUST
 Ruban A. – c.t.s., docent USUST
 Kuzmenko S. – PhD student at USUST
 Riabtsev O. – PhD student at USUST
 Anosov O. – PhD student at USUST
 Kravchenko V. – PhD student at USUST



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>

Мета і завдання дослідження. В роботі запропоновано скореговану методику встановлення кореляційних взаємозв'язків між вихідними параметрами і кінцевими показниками з урахуванням технологічної інерційності процесу – «транспортного запізнення». «Транспортне запізнення» - це той період часу, на який буде відбуватись запізнення приходу шихтових матеріалів в реакційну зону печі де утворюється кінцевий склад феросплаву.

Матеріали та методи дослідження. В роботі запропонована методика при проведенні експериментальних плавів в промислових умовах, яка дозволила визначити час «транспортного запізнення» при виплавці феросилікомарганцю з базовим вмістом марганцю (65-68%). Змінення вмісту заліза (з 3% до 11%) і марганцю (з 76% до 68%) в феросилікомарганці засвідчувало про відповідність отриманого кінцевого сплаву зміненому раніше складу шихти.

Промислові дослідження проводились в умовах феросплавного цеху АТ «Нікопольський завод феросплавів» на печі РПЗ-63, яка виплавляла феросилікомарганець складу: 73-74% Mn, 17-18% Si, 6-7% Fe, за прийнятою технологією. Авторами роботи було проведено промисловий експеримент з переходу на інший склад металу із зниженим вмістом марганцю. Робота печі під час досліджень включала період, в який відбувався перехід від виплавки товарного феросилікомарганцю (сплав марки МнС17) з раніше вказаним вмістом марганцю і заліза до базових відповідно до ДСТУ3548-97 величин вмісту цих елементів в феросилікомарганцю, %: Mn не менше 65, Si в межах 15-20.

Виплавку феросилікомарганцю такого складу вели з марганцевої сировини з добавкою в шихту

залізородних матеріалів. Слід зазначити, що такий сплав характеризується підвищеною щільністю і меншою крихкістю, що сприяє під час фракціонування зменшенню виходу відсіву (фр. 0-10 мм) практично в 2 рази. В якості залізвмісного компонента шихти використовували сирі залізородні обкотиші (62-63% Fe), витрати яких складали 6-10 т. за робочу зміну. Це призводило до зниження вмісту марганцю у готовому сплаві з 76% до рівня ДСТУ 3548-97, а саме – не менше 65%.

Сутність методики при обробці даних промислового експерименту полягала в точному фіксуванні часу завантаження на колошник феросплавної електропечі шихти з обкотишами і зміни вмісту марганцю в феросплаві, який було отримано.

Результати дослідження та їх обговорення. При підвищенні маси заліза змінювалась доля марганцю в сплаві, що давало змогу визначити час «транспортного запізнення». Різниця часу між завантаженням експериментальної шихти та зміна вмісту марганцю у хімічному складі готового феросилікомарганцю і була визначена як «транспортне запізнення». В кінці експерименту визначали «транспортне запізнення» за робочими змінами (плавками) - закінчення завантаження обкотишів в піч і зміни маси марганцю у феросплаві, який було отримано. Для підвищення надійності висновків нами було проаналізовано роботу печі впродовж 81 робочих змін, що склало майже 27 діб безперервної роботи. Графічні результати досліджень наведені на рис. 1. Слід зазначити, що рис. 1б, є продовженням рис. 1а за віссю абсцис, на якій зафіксовано кількість змін протягом 27 діб безперервного експеримента. а та рис.1б.

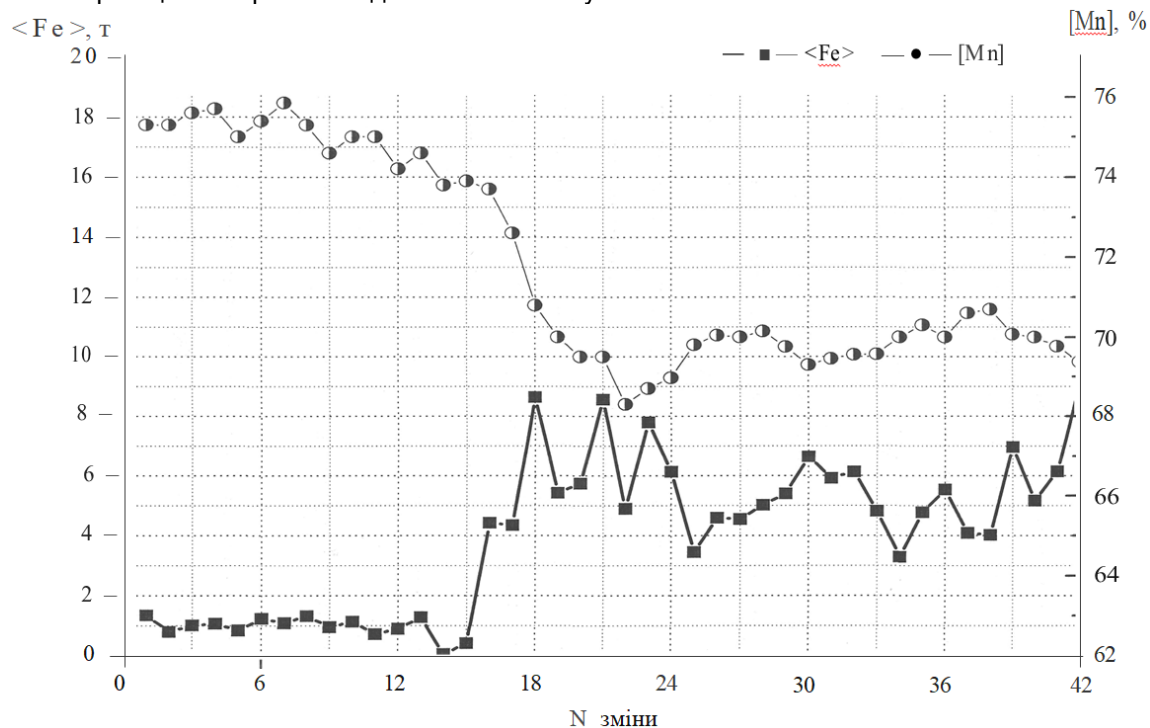


Рис. 1, а — Характер зміни маси заліза, заданого з шихтою і отриманої частки (%) марганцю в сплаві

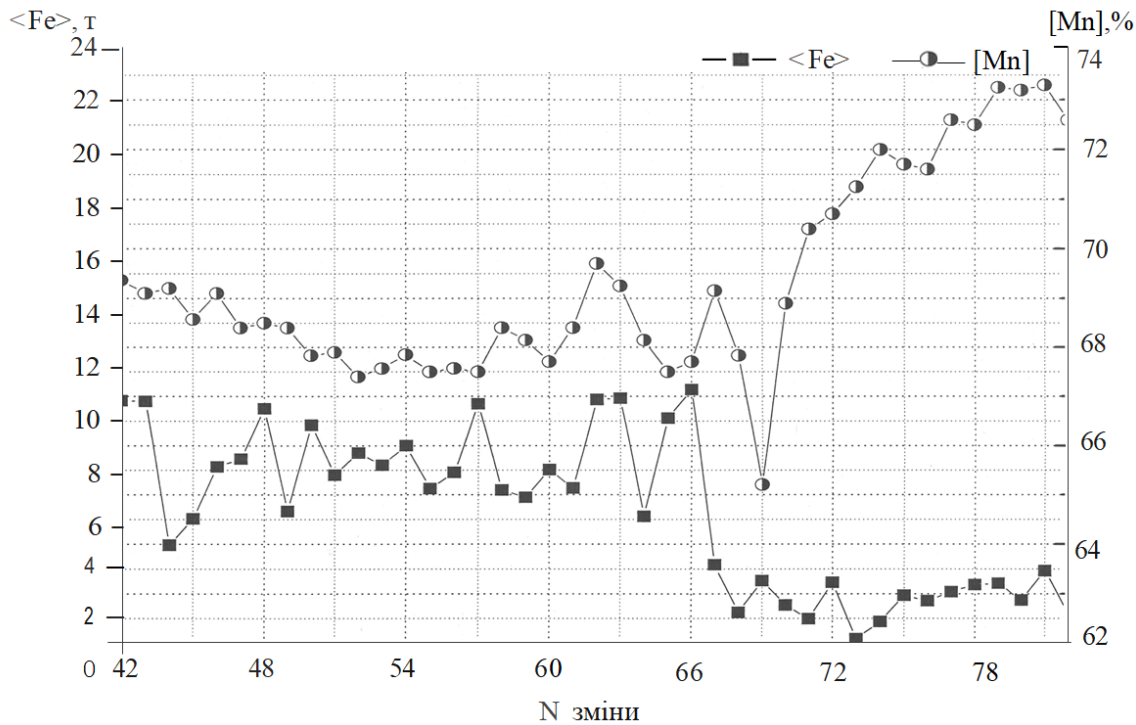


Рис. 1, б - Характер зміни маси заліза, заданого з шихтою і отриманої частки (%) марганцю в сплаві

З урахуванням отриманих результатів авторами у подальшому було опрацьовано масив даних стабільної роботи печі впродовж 2х місяців – 180 робочих змін. Під час формування масиву даних «транспортне запізнення» спожитої шихти, що відповідає випущеному металу, враховувалося наступним чином: маса шихти витрачена на виробництво металу відповідає кількості шихти, яка завантажена в піч протягом цієї зміни, але склад відповідає складу шихти завантаженому 2 зміни тому. Перерахунок «транспортного запізнення», як кількість спожитої шихти, до кількості отриманого металу, проводиться за формулою:

$$m_{1к(n)} = (m_{1(n-2)}/m_{ш(n-2)})m_{ш(n)}, \quad \text{т}, \quad (1)$$

де $m_{1к(n)}$ – вага компоненти 1, яка скоригована з урахуванням «транспортного запізнення», т.; $m_{1(n-2)}$ – вага компоненти 1 за даними журналу із запізненням 2 зміни, т.; $m_{ш(n-2)}$ – загальна вага шихти із запізненням на 2 зміни, т.;

$m_{ш(n)}$ – загальна вага шихти за поточну зміну, т.

Сумісне відновлення марганцю і кремнію під час виплавки феросилікомарганцю супроводжується протіканням складних фізико-хімічних процесів. При цьому шихтові матеріали проходять різні температурні зони, зазнаючи ряд змін: дегідратацію, дисоціацію оксидів і карбонатів, часткове або повне відновлення оксидів, шлакоутворення, поділ продуктів плавки на шлакову та металеву фази, остаточне формування розплаву.

Кількість металу знаходиться у тісному зв'язку з температурними умовами плавки, що визначаються електричним режимом. На електричний режим, у свою чергу, впливають хімічний та гранулометричний склад шихтових матеріалів, їх

співвідношення, кількість внесеної ними вологи, час перебування у різних зонах, умови шлакоутворення.

При такому багатофакторному впливі на результати процесу як критерії ефективності можуть бути обрані два-три кінцеві параметри процесу і як інтегральний показник - зміна економічної ефективності. Такими критеріями ефективності процесу виплавки феросилікомарганцю обрано наступні техніко-економічні показники (ТЕП): продуктивність печі - критерій, що дає оцінку основної мети процесу (при певних обмеженнях за встановленою потужністю пічного трансформатора та змістом основного провідного елемента у вихідній шихті, в даному випадку марганцю); ступінь вилучення марганцю як провідного елемента; питома витрата електроенергії [1,10].

Таким чином, встановлено, що час «транспортного запізнення» для феросплавних електропечей типу РПЗ-63 складає 16 годин. Тобто 2 зміни. При такому підході коректність результатів статистичної обробки впливу вихідних даних на кінцеві показники виплавки феросилікомарганцю значно підвищилась.

Найбільш ефективний метод встановлення кількісних оцінок та діючих закономірностей, заснований на дослідженні статистичних взаємозв'язків у фактичних даних, що характеризують процес за тривалий період часу. Це дає можливість за допомогою статистичного аналізу встановити характер зв'язків та взаємного впливу електричних характеристик та параметрів технологічного процесу, дати їх кількісну та якісну оцінку з метою можливості своєчасного реагування на відхилення у технологічному процесі.

Відповідна обробка результатів спостережень за складом шихтових матеріалів, ходом технологічного процесу, кількістю та якістю продукції дозволяє передбачати можливість порушення необхідних параметрів кінцевих продуктів виробництва, коли їх якість знаходиться в заданих межах і своєчасно вводити відповідні корегування, які забезпечують сталість технологічного режиму [12-14].

Під час виробництва феросплавів у рудовідновлювальних печах основними пояснювальними змінними, від яких залежить інтенсивність протікання технологічного процесу, є електричні характеристики та час, витрачений на виробництво

металу (від закриття льотки попереднього випуску металу до закриття льотки поточного).

На етапі параметризації було встановлено такі результуючі змінні: кількість спожитого піччю марганцю $\langle Mn \rangle$, т; кількість марганцю, який було отримано $[Mn]$, т; кількість металу, який було виплавлено $[Me]$, т; кількість витраченої електроенергії Q_p , кВт год; продуктивність печі P_p , т/год. Перелік та діапазон зміни значень електричних характеристик наведених до одного електрода, час, витрачений на виробництво металу, кількість, склад та маса провідних елементів шихти та металу, який було отримано представлені в табл. 1

Таблиця 1 – Перелік та характеристика вихідних даних (за зміну)

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Макс.	Сер.	Мін.
Вага марганцю, що спожито піччю	$\langle Mn \rangle$	т	106,9	64,4	20,1
Час, витрачений на виробництво металу	$t_{мет}$	хв.	759	452	140
Маса отриманого марганцю	$[Mn]$	т	95,15	48,3	14,3
Вага металу, який отримано	$[Me]$	т	130,7	66,8	20,0
Продуктивність печі	P_p	т/год	14,8	8,9	1,6
Кількість витраченої електроенергії	Q_p	МВт·год	563	286	66
Струм електрода	$I_{\text{э}}$	кА	93,3	78,6	55,0
Опір електрода	$R_{\text{э}}$	МОм	1,37	0,93	0,47

Результати регресійного аналізу використовувалися для отримання рівнянь впливу значень вхідних змінних на ТЕП роботи печі: продуктивність P_p , вилучення марганцю $\eta_{Mn} = [Mn] / \langle Mn \rangle$; питома витрата електроенергії на тону готового сплаву, $Q_{уд} = Q_p / [Me]$.

$$P_p = 0,0039 \cdot I_{\text{э}}^{1,852} \cdot R_{\text{э}}^{0,959} \cdot t_{мет}^{-0,049}, \quad (2)$$

$$\eta_{Mn} = \frac{[Mn]}{\langle Mn \rangle} = 0,007 \cdot I_{\text{э}}^{0,436} \cdot R_{\text{э}}^{-0,005} \cdot t_{мет}^{0,453}, \quad (3)$$

$$Q_{уд} = \frac{Q_p}{[Me]} = 2,217 \cdot I_{\text{э}}^{0,019} \cdot R_{\text{э}}^{-0,132} \cdot t_{мет}^{0,093} \quad (4)$$

Висновки

Враховуючи велику інерційність закритої феросплавної печі і значні коливання між вихідними і кінцевими даними було прийнято проводити усереднення результатів не за плавками, а за робочими змінами. При такому підході підвищується коефіцієнт кореляції при визначенні функціональних зв'язків поміж вихідними параметрами і кінцевими показниками.

Експериментально встановлено, що за умов безперервної роботи рудовідновлювальної електропечі РПЗ-63 при стабільній потужності у денні та нічні зміни час «транспортного запізнення» складає 16 годин - тобто 2 зміни.

На основі обробки масиву даних промислових плавок феросилікомарганцю в роботі встановлено залежності впливу опору електрода ($R_{\text{э}}$) на продуктивність печі (P_p), питоми витрати електричної енергії (Q_p) та коефіцієнт вилучення марганцю у сплав (η_{Mn}).

Перелік посилань

1. Гасик М.І. Марганець. - М.: Металургія. - 1992. 608с.
2. Металургія марганцю України /Б.Ф.Величко, В.О.Гаврилов, М.І.Гасик та ін.; Під загальною та наук.ред. акад. НАН України М.І. Гасика. – К.: Техніка, 1996. – 472с.
3. Ferroalloys. Theory and Practice. Gasik, M., Dashevskii, V., Bizhanov, A. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Springer Nature, Switzerland, 2020, 531 p. 10.1007/978-3-030-57502-1_1.
4. Technical development of ferrosilicon manganese production in ore-smelting electric furnaces with using of manganese magnesia agglomerate. Kutsin, V.S., Olshanskiy, V.I., Dedov, U.B., Ovcharuk, A.N., Polyakov, O.I. Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 17–24
5. Теоретичні основи і технологія електросталі і феросплавів: підручник для студентів закладів вищої освіти / М. І. Гасик, Ю. С. Проїдак, В. А. Гладких, А. П. Горобець, А. М. Головачов, І. В.Дерев'янку, О. В.Жадонос,

- А. В.Рубан, А.Ю.Пройдак ; за заг. ред. Ю. С. Пройдака ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. - Дніпро : ПБП "Економіка", 2023. - 280 с. : іл., табл., діагр. - Бібліогр.: с. 275-277.
6. Гасик М.І., Лякішев М.П. Фізикохімія та технологія електроферосплавів: Підручник для вузів. - Дніпропетровськ: ДНВП "Системні технології", 2008. - 453с. - ISBN 966-8421-40-2.
 7. Куцін В.С., Гладких В.А., Кузьменко С.М. та ін. Визначення оптимальних параметрів електричного режиму при виплавці феросилікомарганцю // *Сталь*, 2009. - №1. - С. 55-57.
 8. Projdak, Yu.S., Gladkykh V.A. and Ruban A.V. (2022). Studying the Phase Equilibria in MnO-SiO₂ System by the Differential Scanning Calorimetry (DSC) Method. *Sci. innou.* 18(2), 100-107. doi:10.15407/scine18.02.100
 9. Ольшанський В.І., Гладких В.А., Кузьменко С.М., Овчарук О.М., Лисенко В.Ф., Рубан А.В. Дослідження основних функціональних зв'язків між технологічними параметрами, електричними характеристиками та техніко-економічними показниками виплавки феросилікомарганцю // *Металургійна та гірничорудна промисловість*, 2012. - №3. - С. 25-29.
 10. Цимбал В.П. Математичне моделювання металургійних процесів - М.: Металургія, 1986, -256 с.
 11. Хорьков С.А. Результати статистичного моделювання електроспоживання дугової сталеплавильної печі / С.А.Хорьков, С.А. Книжов. // *Сталь*. - 2005. - №5. - С. 37-38.
 12. Сівець С.А. Економетричне моделювання / С.А. Сівець, І.А. Левикіна - Запоріжжя : Поліграф, 2003. - 220 с.
 13. Вільям Орвіс. Excel для вчених, інженерів і студентів / Вільям Орвіс перекл. з англ. - К.: Юніор, 1999.-528 с.
 14. Статистичний аналіз технології виплавки високовуглецевого феромарганцю з використанням марганцевої сировини ПАР. Гладких В.А., Дєдов Ю.Б., Михалев О.І., Лисенко В.Ф., Лисий Д.А. // *Сталь*, 2001, №7, С. 400-406.

References

1. Gasik, M. I. (1992). *Marhanets*. Metalurhiia
2. Gasik M. I. (Ed.). (1996). *Metalurhiia marhantsiu Ukrainy*. Tekhnika
3. Gasik, M., Dashevskii, V., & Bizhanov, A. (2020). Physicochemical Fundamentals of Ferroalloy Processes. In: *Ferroalloys. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57502-1_1
4. Kutsin, V. S., Olshanskiy, V. I., Dedov, U. B., Ovcharuk, A. N., & Polyakov, O. I. (2020). Technical development of ferrosilicon manganese production in ore-smelting electric furnaces with using of manganese magnesia agglomerate. In: *Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*. (pp. 17–24)
5. Proydak Yu. S. (Ed.). (2023). *Teoretychni osnovy i tekhnolohiia elektrostali i ferosplaviv*. PBP "Ekonomika". (pp. 275-277)
6. Gasik M. I., & Liakishev M. P. (2008). *Fizykokhimiia ta tekhnolohiia elektroferosplaviv*. DNVP "Systemni tekhnolohii"
7. Kutsin, V. S., Gladkykh, V. A., Kuzmenko, S. M. et al. (2009). Vyznachennia optymalnykh parametriv elektrychnoho rezhymu pry vyplavtsi ferosylikomarhantsiu. *Stal*, (1), 55-57
8. Projdak, Yu. S., Gladkykh V. A. & Ruban A. V. (2022). Studying the Phase Equilibria in MnO-SiO₂ System by the Differential Scanning Calorimetry (DSC) Method. *Sci. innou.*, 18(2), 100-107. <https://doi.org/10.15407/scine18.02.100>
9. Olshanskyi, V. I., Gladkikh, V. A., Kuzmenko, S. M., Ovcharuk, O. M., Lysenko, V. F., & Ruban, A. V. (2012). Doslidzhennia osnovnykh funktsionalnykh zviazkiv mizh tekhnolohichnymy parametramy, elektrychnymy kharakterystykamy ta tekhniko-ekonomichnymy pokaznykamy vyplavky ferosylikomarhantsiu. *Metalurhiina ta hirnychorudna promyslovisht*, (3), 25-29
10. Tsymbal, V. P. (1986). *Matematychni modeliuvannia metalurhiinykh protsesiv*. Metalurhiia
11. Khorkov S. A. & Knyzhov S.A. (2005). Rezultaty statystychnoho modeliuvannia elektrospozhyvannia duhovoї staleplavylnoi pechi. *Stal*, (5), 37-38
12. Sivets, S. A. & Levykina I. A. (2003). *Ekonometrychni modeliuvannia*. Polihraf
13. Orvis V. (1999). *Excel dlia vchenykh, inzheneriv i studentiv*. Yuniur
14. Gladkikh, V. A., Dedov, Yu. B., Mykhaliev, O. I., Lysenko, V. F., & Lysyi, D. A. (2001). Statystychnyi analiz tekhnolohii vyplavky vysokovuhletsevoho feromarhantsiu z vykorystanniam marhantsevoi syrovyny PAR. *Stal*, (7), 400-406.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 11.12.2023

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024