МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.1 УДК 669.162

Слисєєв В.І.^{1,2}, к.ф-м.н., ORCID: 0000-0003-4999-8142, e-mail: ovoch-isi@outlook.com Маначин І.О.¹, к.т.н., с.д., ORCID: 0000-0001-9795-6751, e-mail: ovoch-isi@outlook.com Кисляков В.Г.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0002-1775-5050, e-mail: ovoch-isi@outlook.com Руденко О.Л.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0001-6068-9901, e-mail: ovoch-isi@outlook.com Чубіна О.А.³, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-2213-5013, e-mail: ms.chubina@ukr.net ¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро ²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАНУ, м. Дніпро ³Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Yelisieiev Volodymyr^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing
Manachyn Ivan¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Reseach Scientist, Senior Researcher of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing
Kislyakov Volodymyr¹, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing
Rudenko Oleksandr¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Out-of-Furnace Cast Iron Processing Department
Chubina Olena³, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure
¹Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute NASU, Dnipro
²M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics NASU, Dnipro
³Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИПАРОВУВАННЯ ТА РОЗЧИНЕННЯ МАГНІЮ В РУХОМИХ БУЛЬБАШКАХ

У роботі наводяться результати дослідження кінетики процесу десульфурації за участю частинок магнію. Виконано математичний опис руху бульбашки з урахуванням її радіусу, коефіцієнту поверхневого натягу, густини рідкого металу, густини газу, гідравлічного тиску та умов масопереносу в розплаві. Наведено результати розрахунків для варіантів, де показані криві підйому бульбашок із частинкою магнію радіусом 1 мм. З'ясовано, що процес випаровування залежить від концентрації магнію в глибині металу. Виконано оцінку маси пари в бульбашці та зміни радіуса бульбашки під час підйому. Показано, що швидке випаровування магнію призводить до збільшення радіусів бульбашок, які спливають, та їхнє швидке схлопування пов'язане з розчиненням парів у рідкому металі. Представлена кінетична модель показує фізикохімічний перебіг процесу надходження магнію з бульбашок у розплавлений метал під час обробки чавуну зернистим магнієм. Отримані результати розрахунків мають практичну цінність при освоєнні технології в промислових умовах.

Ключові слова: рафінування чавуну; магній; бульбашка; кінетика; модель.

The aim of the work is to study the kinetics of the desulfurization process involving magnesium particles. The problem was formulated to mathematically describe the bubble motion taking into account the bubble radius, surface tension coefficient, liquid metal density, gas density, hydraulic pressure, and mass transfer conditions in the melt. The results of calculations for the variants showing the curves of bubble rise with a magnesium particle with a radius of 1 mm are presented. It is shown that the vaporization process depends on the boundary condition, i.e., on the concentration of magnesium in the depth of the metal. The mass of vapor in the bubble and the change in the bubble radius during the ascent are estimated. It is shown that the rapid evaporation of magnesium, which leads to an increase in the radii of the bubbles that rise, as well as their rapid collapse, is associated with the dissolution of vapors in the liquid metal. The presented kinetic model shows the physicochemical course of the process of magnesium flow from bubbles into molten metal during the treatment of cast iron with granular magnesium. The obtained calculation results are of practical value for the development of the technology in industrial conditions

Keywords: cast iron refining; magnesium; bubble; kinetics; model.

Постановка проблеми

Десульфурація чавуну може проводитися із застосуванням різних реагентів. Для кожного реагента важливо знати фізичну картину взаємодії часток відповідного реагента з розплавленим металом. Для реалізації стабільної роботи обраної технології значний інтерес становлять кінетичні питання десульфурації за участю частинок. З подальшим розвитком технологічних методів десульфурації чавуну та їх удосконаленням постають нові питання, які потребують теоретичного аналізу та чисельних оцінок як усього процесу, так і його деталей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Наукові та практичні питання десульфурації сірки знайшли своє відображення у численних публікаціях, зокрема, досвід практичної роботи, аналіз сучасного стану та наукові основи процесу узагальнені у монографіях [1, 2]. У роботах [3, 4] була розроблена математична модель розчинення парів магнію, що містяться в бульбашці, що рухається, де було показано, що навіть порівняно великі бульбашки встигали віддавати розплаву практично всю масу газоподібного магнію. У роботі [5] за допомогою чисельного аналізу вдалося показати, що за наявності хімічної реакції Mg + S \Leftrightarrow MgS, яка проходить у прикордонному шарі бульбашки, пари магнію досить швидко йдуть у розплав, навіть при його блокуванні. Ця теорія була розвинена у роботах Зборщика А.М., Курганова В.А., Бичкова Ю.Б.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження кінетики процесу десульфурації за участю частинок магнію.

Виклад основного матеріалу

Постановка задачі

У роботі розглянемо рух бульбашки, що містить частинку магнію з урахуванням його випаровування і розчинення в рідкому металі. Процес прогріву частинки та її розплавлення укладається в десяті і навіть соті долі секунди, тому його можна не розглядати, так як при робочих температурах та глибині подачі магнію цей час незначний.



Рис. 1. Схема розташування рідкого магнію в бульбашці, яка прийнята в розрахунках

Розгляд почнемо з моменту, коли частинка магнію розплавилася і заповнила деякий сегмент у нижній частині бульбашки (рис. 1). Приймаємо, що рідкий магній змочує рідкий чавун, тому рідка крапля магнію прилягає до металу. При цьому температура поверхні рідкої краплі магнію дорівнює температурі рідкого металу. Необхідно зазначити, що вхід частинки в метал за великих швидкостей супроводжується утворенням каверни [6], в яку втікає газ, захоплений частинкою. Для одиночної частинки це можна оцінити за розміром і швидкістю входження частинки. У цьому випадку, коли на поверхню металу падає двофазний струмінь із великою концентрацією частинок, а сама поверхня перебуває в хаотичному коливальному стані, оцінити це практично неможливо, тому початковий вміст газу в бульбашці будемо варіювати. Увівши коефіцієнт $k = V_{G,0} / V_{Mg,0}$ ($V_{G,0}$ — початковий об'єм газу в бульбашці; $V_{Mg,0}$ — початковий об'єм частинки магнію), приймемо, що він у різних варіантах змінюється від 1 до 10. Далі вважаємо, що бульбашка піднімається з деякої заданої глибини, змінюючись дещо в об'ємі через зміну гідравлічного тиску. На деякій глибині, коли термодинамічна температура випаровування рідкого магнію дорівнюватиме температурі рідкого металу, під'йом бульбашки супроводжуватиметься випаровуванням магнію, при цьому вважатимемо, що поверхня магнію за квазірівноважних умов дорівнюватиме температурі випаровування. Використовуючи математичну модель робіт [3—5] напишемо тепер такі рівняння.

$$\frac{dX_P}{dt} = U_P = \left[gR_P\frac{\rho_M - \rho_P}{\rho_M + \rho_P} + \frac{\sigma_M}{R_P(\rho_M + \rho_P)}\right]^{1/2},\tag{1}$$

де X_P — шлях бульбашки; U_P — швидкість руху і підняття бульбашки; R_P — радіус бульбашки; σ_M — коефіцієнт поверхневого натягу; ρ_M — густина рідкого металу, ρ_P — густина газу.

Це рівняння руху бульбашки характеризує квазірівноважний підйом її в рідині [7]. У нашому випадку під радіусом бульбашки розумітимемо еквівалентний радіус, тобто

$$\frac{4}{3}\pi R_{p}^{3} = V_{Mg} + V_{G}, \qquad (2)$$

де V_{Mg} — об'єм, який займає рідкий магній; V_G — об'єм парогазової суміші в бульбашці, а під густиною ρ_P — величину

$$\rho_{P} = (m_{G} + m_{P} + m_{Mg})/(V_{Mg} + V_{G}), \qquad (3)$$

де m_G — маса газу (величина постійна, що задається); $m_P = \int_0^t G_{Mg,I} dt - \int_0^t G_{Mg,R} dt$ — маса пари магнію ($G_{Mg,I}$ — витрата магнію, що випаровується, $G_{Mg,R}$ — витрата пари магнію, що розчиняється в розплаві); $m_{Mg} = m_{Mg,0} - \int_0^t G_{Mg,I} dt$ — маса рідкого магнію, при цьому

 $V_{Mg} = m_{Mg} / \rho_{Mg}.$

Далі випишемо рівняння стану та гідравлічного тиску у вигляді:

$$p_P V_G = (m_G + m_P) R_S T_P; \tag{4}$$

$$p_P = p_a + \rho_M g h_P + \sigma_M / R_P, \qquad (5)$$

де $R_s = R\left(\frac{c_G}{M_G} + \frac{c_{Mg}}{M_{Mg}}\right)$ — газова постійна суміші; R — універсальна газова стала; M_G , M_{Mg} —

мольні маси газу та магнію; $c_{Mg} = m_p / (m_p + m_G)$ — концентрація пари магнію в бульбашці; $T_P = T_M$ — температура газової суміші, температура розплаву; h_P — глибина, де знаходиться бульбашка.

Із цих залежностей необхідно визначити парціальний тиск парів

$$\frac{p_{Mg}}{p_P} = x_{Mg} = \left(\frac{c_G}{M_G} + \frac{c_{Mg}}{M_{Mg}}\right)^{-1} \frac{c_{Mg}}{M_{Mg}},$$
(6)

де x_{Mg} — мольна концентрація пари в суміші.

Ця умова слугує для визначення концентрації магнію $\gamma_{M_{g,P}}$ на поверхні металу з термодинамічної умови рівноваги.

$$lg(100\gamma_{Mg,P}) = \frac{7000}{T_P} - 5.1 + lg\frac{P_{Mg}}{10^5}.$$
(7)

Витрату магнію, що випаровується, визначимо приблизно так. Уявімо об'єм лінзи, який займає рідкий магній, у вигляді диска з рівним об'ємом і рівною вільною поверхнею (на рис. 1 це показано пунктирною лінією), тобто

$$V_{Mg} = \pi R_P^3 \left[1 - \cos \vartheta - \frac{1}{3} \left(1 - \cos^3 \vartheta \right) \right] = \pi R_P^2 Sin^2 \vartheta \cdot h_{Mg}$$

Витрату магнію, що випаровується, можна отримати, вважаючи, що процес квазістаціонарний, тобто теплові потоки, що йдуть до рідкого магнію, витрачаються на приховане фазове тепло:

$$G_{M_g,I}H_I = (q_L + q_T)S_{M_g}, \qquad (8)$$

де H_I — приховане фазове тепло; $q_L = \sigma_B \left[\left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_I}{100} \right)^4 \right]$ — тепловий потік

випромінювання, $\sigma_{\scriptscriptstyle B}$ — коефіцієнт Больцмана; $q_{\scriptscriptstyle T} = \lambda_{\scriptscriptstyle Mg} \frac{T_{\scriptscriptstyle m} - T_{\scriptscriptstyle I}}{h_{\scriptscriptstyle Mg}}$ — тепловий потік від рідкого

металу, що надходить за рахунок теплопровідності, S_{Mg} — поверхня магнієвої краплі;

$$T_I = \frac{7115}{10.162 - \lg p_{M_g}},\tag{9}$$

де *Т* — температура випаровування магнію [1, 2].

Тепер до цієї системи необхідно додати умови масопереносу в розплаві

$$G_{Mg,R} = 4R_P^2(\pi - \vartheta)g_{Mg}, \quad g_{Mg} = \rho_M \alpha (\gamma_{Mg,P} - \gamma_{Mg,M}), \tag{10}$$

де *α* — коефіцієнт масовіддачі; *γ*_{Mg,M} — концентрація магнію в металі. Для оцінки величини α використаємо критеріальне співвідношення

$$Nu = \frac{2R_P \cdot \alpha}{D_{M_R}} = 2 + 0.6 \operatorname{Re}_P^{0.55} Sm^{\frac{1}{3}}, \qquad (11)$$

де D_{Mg} — коефіцієнт дифузії молекул магнію в металі; $\text{Re}_P = 2R_P U_P / v_M$ — число Рейнольдса; v_M — кінематичний коефіцієнт в'язкості металу; $Sm = v_M / D_{Mg}$ — число Шмідта. Коефіцієнт дифузії у розрахунках приймався рівним 3·10⁻⁹ м²/с [8].

Результати розрахунків

Наведемо результати розрахунків для чотирьох варіантів. На рис. 2 (а—г) показано криві підйому бульбашок із частинкою магнію радіусом 1 мм.

З рисунків випливає, що криві підйому слабко викривлені, що свідчить про невеликі зміни швидкостей під час руху. Крім того, добре видно, що чим більша бульбашка, тим повільніше вона піднімається. Це експериментальний факт для порівняно невеликих бульбашок, який відображений у виписаній формулі (1), що описує криву типу параболи з мінімумом у точці $R_P = \sigma_M / \rho_M g$ (у нашому випадку при $\sigma_M = 1.8$ Н/м і $\rho_M = 7000$ кг/м³ $R_P = 0.0051$ м, що відповідає $U_P = 0.317$ м/с). Таким чином, на підйом із глибини 4 м йде приблизно 9—12 с, а з глибини 2 м — 5—6 с. За цей час рідкий магній, що знаходиться в бульбашці, випаровується і розчиняється в розплаві.



Ряд 1 — k =1; ряд 2 — k = 2; ряд 3 — k = 4; ряд 4 — k = 6; ряд 5 — k = 8; ряд 6 — k = 10.

Рис. 2. Криві підйому бульбашок із частинкою магнію радіусом 1 мм

Цей процес добре проглядається на рис. 3 (а—г), де видно, що він загалом займає не більше двох секунд. Для металу з температурою 1473 К випаровування починається на шостій секунді (рис. 3 а), що відповідає приблизно глибині 2 м. (температура випаровування дорівнює температурі металу). Для більш високої температури початок випаровування починається раніше, близько 2,5—3 с, що відповідає приблизно 3 м глибини. У четвертому варіанті підйом бульбашки починається з 2 м, тому магній практично миттєво випаровується на самому початку руху.

Крім зазначеної особливості випаровування, на представлених рисунках видно дуже важливу деталь: процес залежить від граничної умови, тобто від концентрації магнію в глибині металу.



Ряд 1 — k = 1; ряд 2 — k = 2; ряд 3 — k = 4; ряд 4 — k = 6; ряд 5 — k = 8; ряд 6 — k = 10.

Puc.	3.	Криві	маси	пари	В	бульба	ашці
------	----	-------	------	------	---	--------	------

Там, де с_{Мg,Ch} = 0 (рис. 3 а, б), пари магнію йдуть з бульбашок повністю (початкова стадія десульфурації). У разі, якщо концентрація магнію в металі висока (кінцева стадія), то вище спостерігається повернення пари в бульбашку. У четвертому варіанті це слабко проглядається, у третьому — добре видно, що пари в бульбашці під час наближення її до поверхні стає навіть більше, ніж було. Цю важливу особливість слід враховувати в практичній діяльності.

Зазначені деталі добре проглядаються і в наступній серії рисунків, у яких наведено криві зміни радіусів бульбашок. З рис. 4 а і б випливає, що радіуси поступово збільшуються. Це пов'язано з гідравлічним падінням тиску. Потім спостерігаються сплески, аналогічні рисункам 3, а потім таке ж невелике зростання. У випадку, коли с_{Mg,Ch} = 0,003, радіуси бульбашок зростають значно швидше, про що свідчать криві рис. 4 в і г.



Ряд 1 — k =1; ряд 2 — k = 2; ряд 3 — k = 4; ряд 4 — k = 6; ряд 5 — k = 8; ряд 6 — k = 10.

Рис. 4. Криві зміни радіуса бульбашки під час підйому

На рис. 5 наведено інтегральні криві, що характеризують процес загалом.

За цими рисунками добре простежується, як переходить магній у рідкий метал залежно від коефіцієнта $k = V_{G,0} / V_{Mg,0}$. На рис. 4. а видно, що криві помітно розшаровуються, для інших варіантів процес іде більш інтенсивно, тому розшарування звужується. У всіх варіантах криві з нуля виходять на показники, які дорівнюють початковій величині маси магнію. Так, у першому і в другому варіантах останні значення дорівнюють 7,28—7,30-10⁻⁶ кг для частинки масою 7,285—10⁻⁶ кг, тобто помилки становлять менше 0,1 відсотка. У двох інших варіантах (рис. 5 в і г) після виходу на початкову величину маси магнію криві поступово знижуються, що пов'язано зі зворотним входженням парів у бульбашки.



Ряд 1 — k =1; ряд 2 — k = 2; ряд 3 — k = 4; ряд 4 — k = 6; ряд 5 — k = 8; ряд 6 — k = 10.

Рис. 5. Криві розчиненої маси магнію

Висновки

Проведені розрахунки показали динаміку утворення і поведінки відносно невеликих бульбашок суміші несучого газу з парами магнію, що рухаються в розплавленому чавуні. Показано, що швидке випаровування магнію призводить до збільшення радіусів бульбашок, які спливають, а також їхнє швидке схлопування, пов'язане з розчиненням парів у рідкому металі. Така поведінка характерна для початкової стадії процесу десульфурації, коли концентрація магнію в металі практично дорівнює нулю. Для випадку порівняно високої його концентрації (кінцева стадія процесу) можливий ефект повернення розчиненого магнію в бульбашку, тому що парціальний тиск пари магнію в бульбашці може виявитися нижчим за необхідну величину. Ця цікава особливість пов'язана як з концентрацією парів магнію в самій бульбашці, так і з умовами знаходження у рідкому металі. Таким чином, представлена кінетична модель показує фізикохімічний перебіг процесу надходження магнію з бульбашок у розплавлений метал під час обробки чавуну зернистим магнієм. Отримані результати розрахунків мають практичну цінність при освоєнні технології в промислових умовах.

Список використаної літератури

- 1. Шевченко А.П., Большаков В.І., Башмаков А.М. Технологія та обладнання десульфурації чавуну магнієм у великовантажних ковшах. Київ. Наукова думка. 2011. 208 с.
- 2. Шевченко А.П., Маначин І.А., Вергун О.С., Двоскін Б.В., Кисляков В.Г., Шевченко С.А., Остапенко О.В. Позапічна десульфурація чавуну в ковшах. Технологія, дослідження, аналіз, вдосконалення. Дніпро – VAL. 2017. 252 с.
- Булахтін А.С., Єлісєєв В.І., Шевченко А.П. та ін. До питання масообміну магнієвмісних бульбашок з розплавом чавуну. Зб. наук. пр. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. ІЧМ. НАНУ. 2005. Вип. 11. С. 57–66.
- 4. Булахтін А.С., Єлісєєв В.І., Курилова Л.П., Руденко О.Л. Модель руху і розчинення магнійвмісних бульбашок у розплаві чавуну. Теорія і практика металургії. 2007. № 2–3. С. 70– 74.
- Єлісєєв В.І., Булахтін А.С., Курилова Л.П., Шевченко А.П. Дослідження особливостей динаміки і розчинення паромагнієвих бульбашок, що спливають у розплаві чавуну. Зб. наук. тр. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. ІЧМ НАНУ. 2008. Вип. 18. С. 91– 105.
- Єлісєєв В.І., Маначин І.О., Шевченко А.П., Шевченко С.А. Оцінка параметрів занурення частинок реагенту з газом у розплав при інжекційній позапічній десульфурації чавуну. Зб. наук. пр. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. ІЧМ НАНУ. 2022. Вип. 36, С. 172–181.
- 7. Маленков І.Г. Про рух великих бульбашок, що спливають у рідині // ЖПМТФ, 1968, № 6, 130–134.
- 8. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The Kinetics of Molten Iron Desulfurisation Using Magnesium Vapor. Metallurgical Transaction B, 1981, V. 12 B, pp. 755–767.

EVAPORATION AND DISSOLUTION OF MAGNESIUM IN MOVING BUBBLES

Abstract

Desulphurization of cast iron can be performed using various reagents. For each reagent, it is important to know the physical picture of the interaction of particles with molten metal. To ensure the stable operation of the chosen technology, kinetic issues of desulphurization involving particles are of great interest. With the further development of technological methods for desulphurization of cast iron and their improvement, new issues arise that require theoretical analysis and numerical estimates of both the entire process and its details

The aim of this work is to study the kinetics of the desulphurization process involving magnesium particles. The problem was formulated to mathematically describe the bubble motion taking into account the bubble radius, surface tension coefficient, liquid metal density, gas density, hydraulic pressure, and mass transfer conditions in the melt. The results of calculations for the variants showing the curves of bubble rise with a magnesium particle with a radius of 1 mm are presented. It is shown that the vaporization process depends on the boundary condition, i.e., on the concentration of magnesium in the depth of the metal. The mass of vapor in the bubble and the change in the bubble radius during the ascent were estimated.

The calculations have shown the dynamics of formation and behavior of relatively small bubbles of a mixture of carrier gas and magnesium vapor moving in molten iron. It is shown that rapid evaporation of magnesium, which leads to an increase in the radii of the bubbles that pop up, as well as their rapid collapse, is associated with the dissolution of vapors in liquid metal. This behavior is typical for the initial stage of the desulfurization process, when the concentration of magnesium in the metal is almost zero. For the case of a relatively high concentration (the final stage of the process), the effect of returning dissolved magnesium to the bubble is possible, because the partial pressure of magnesium vapor in the bubble may be lower than the required value. This interesting feature is related to both the concentration of magnesium vapor in the bubble itself and the conditions in the liquid metal. Thus, the presented kinetic model shows the physicochemical course of the process of magnesium flow from bubbles into molten metal during the treatment of cast iron with granular magnesium. The obtained calculation results are of practical value for the development of the technology in industrial conditions.

References

- [1] Shevchenko, A.F., Bolshakov, V.I., Bashmakov, A.M. (2011). Technologiya ta ustatkuvannia desulfuratsii chavunu magniem u velikovantazhnih kovshah [Technology and equipment for desulfurization of cast iron with magnesium in heavy-duty ladles]. Kyiv: Scientific opinion [in Russian].
- [2] Shevchenko A.P., Manachyn I.O., Verhun O.S., Dvoskin B.V., Kysliakov V.H., Shevchenko S.A., Ostapenko O.V. (2017) Pozapichna desulfuratsiia chavunu v kovshakh. Tekhnolohiia, doslidzhennia, analiz, udoskonalennia [Out-of-furnace desulphurization of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement] Dnipro VAL. [in Russian].
- [3] Bulakhtyn A.S., Yelisieiev V.I., Shevchenko A.P. ta in. (2005) *Do pytannia masoobminu mahniivmisnykh bulbashok iz rozplavom chavunu [On the mass transfer of magnesium-containing bubbles with cast iron melt]* Collection of scientific papers Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. ISI, NASU.. Issue 11. P. 57–66. [in Russian].
- [4] Bulakhtyn A.S., Yelisieiev V.I., Kurylova L.P., Rudenko O.L. (2007) Model rukhu i rozchynennia mahniivmisnykh bulbashok u rozplavi chavunu [A model of the movement and dissolution of magnesium-containing bubbles in a cast iron melt] Theory and practice of metallurgy. № 2–3. P. 70–74. [in Russian].
- [5] Yelisieiev V.I, Bulakhtyn A.S., Kurylova L.P., Shevchenko A.P. (2008) Doslidzhennia osoblyvostei dynamiky ta rozchynennia paromahniievykh bulbashok, shcho splyvaiut u rozplavi chavunu [Investigation of the dynamics and dissolution of paramagnesium bubbles floating in a cast iron melt] Collection of scientific papers Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. ISI, NASU. Issue 18. P. 91–105. [in Russian].
- [6] Yelisieiev V.I., Manachin I.O., Shevchenko A.P., Shevchenko S.A. (2022) Otsinka parametriv zanurennya chastinok reagentu z gazom u rozplav pri inzhektsiinii pozapichnii desulfuratsii chavunu [Estimation of the parameters of immersion of reagent particles with gas into the melt during the injection out-of-furnace desulfurization of cast iron] Collection of scientific papers Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. ISI, NASU.. Issue 36. P. 172–181. [in Russian].
- [7] Malenkov I.H. (1968) Pro rukh velykykh bulbashok, shcho splyvaiut u ridyni [About the motion of large bubbles floating in a liquid] Applied mechanics and technical physics. № 6, 130–134. [in Russian].
- [8] Irons G.A., Guthrie R.I.L. The Kinetics of Molten Iron Desulfurisation Using Magnesium Vapor. Metallurgical Transaction B, 1981, V. 12 B, pp. 755–767 [in English].

Надійшла до редколегії 10.03.2025