

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИFUЗІЇ КОМПОНЕНТІВ В СИСТЕМІ ГНІТ–ГРАФІТОВИЙ ЕЛЕКТРОД НА ПРОМИСЛОВІЙ ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТИПУ ДСП ПС-12

О.В. Махненко, О.С. Костеневич, Г.Ю. Саприкіна, О.Г. Богаченко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Показана можливість застосування апарату математичного моделювання для прогнозування розподілу хімічних компонентів в системі гніт–електрод при роботі в дуговій сталеплавильній печі, враховуючи процеси дифузії. На основі розробленої двовимірної скінченно-елементної моделі процесу дифузії компонентів в цій системі, а також беручи до уваги експериментальні дані щодо залишкового розподілу вмісту компонентів у поперечному перерізі гнотового електрода, визначено коефіцієнти дифузії для кожного компонента, на основі яких проведено моделювання процесу дифузії для оцінки можливого розподілу вмісту компонентів у гнотових електродах збільшеного діаметра і показано результати моделювання з урахуванням різних вихідних концентрацій. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: дугові сталеплавильні печі, графітовані гнотові електроди, питомий електроопір, компоненти, концентрація, дифузія, математичне моделювання

Вступ. Склад гнотів графітованих електродів може змінюватися у широких межах в залежності від типу печі, виду і якості шихти, марки сталей, електричних режимів тощо [1, 2]. Гніт в початковому стані складається із суміші графіту з домішками компонентів, що вміщують Li, Na, K та ін.

Оптимізація початкового (вихідного) хімічного складу гнота для електродів різного типорозміру (діаметра) і призначення може виконуватись шляхом чисельних експериментів (математичного моделювання) процесу взаємної дифузії хімічних елементів (компонентів) в системі гніт–електрод при високих температурах в печі з урахуванням відомих даних стосовно коефіцієнтів дифузії цих елементів в графіті. Але наявність таких даних з урахуванням високих температур у печі (1800...2300 °C) та при дуговій частині самого електрода до 4000 °C у відкритому доступі практично відсутня. Наприклад, в роботах [3–5] представлені експериментальні дані відносно коефіцієнтів дифузії деяких елементів (Li, Na, K) в графіті, але при низьких температурах (25 та 960 °C) [6]. Тому один із шляхів вирішення цих питань є визначення або приблизна оцінка значень коефіцієнтів дифузії компонентів гноту в результаті обробки існуючих експериментальних даних за залишковим вмістом цих компонентів в системі гніт–електрод.

У цій роботі приведені результати першої спроби математичного моделювання процесів дифузії компонентів гнотів для електрода з вихідним ді-

аметром 350 мм і електродів збільшеного діаметра — 508 та 600 мм двох составів (умовне позначення F_0 і F'_0).

Загальний вигляд промислового гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм, що застосовується на 12-тонній промисловій печі постійного струму типу ДСП ПС-12, представлений на рис. 1. В роботі були використані зразки для досліджень, які було відібрано з нижньої (придугової) частини електрода після його роботи на печі впродовж 18 год та подальшого охолодження до кімнатної температури. Зразки відбирали на відстані 35 мм від осі гнота та 80 і 105 мм від границі гніт–електрод щодо фактичного розподілення компонентів гнота в тілі цього електрода (рис. 2).

Методика визначення коефіцієнтів дифузії компонентів в системі гніт–електрод. Розподіл вмісту дифузійного компонента в поперечному перерізі гнотового електрода можна визначити рішенням рівняння дифузії у двовірній постановці:

$$\frac{dc}{dt} = D_c \left(\frac{d^2c}{dx^2} + \frac{d^2c}{dy^2} \right), \quad (1)$$

де c — концентрація дифузійного компонента; D_c — коефіцієнт дифузії дифузійного компонента; t — час; x, y — координати.

Початкові граничні умови:

$$c(t = 0) = c_0 \text{ — в гноті при}$$

О.В. Махненко — <http://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, О.С. Костеневич — <http://orcid.org/0000-0002-7427-2805>,

Г.Ю. Саприкіна — <http://orcid.org/0000-0003-1534-7253>, О.Г. Богаченко — <http://orcid.org/0000-0002-3306-6626>

© О.В. Махненко, О.С. Костеневич, Г.Ю. Саприкіна, О.Г. Богаченко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, 2024

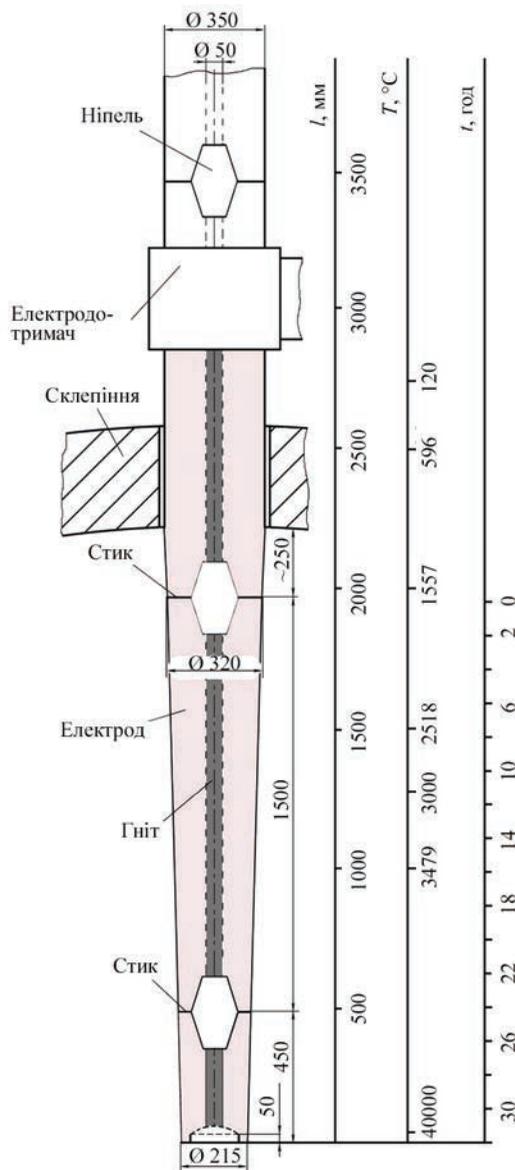


Рис. 1. Розподіл температури та зміни геометричних параметрів у реальному часі роботи в печі для гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм

$$0 < r = \sqrt{x^2 + y^2} < D_{\text{гн}};$$

$c(t = 0) = 0$ — в електроді при

$$D_{\text{гн}} < r = \sqrt{x^2 + y^2} < D_{\text{ел}}. \quad (2)$$

Вихідними для моделювання були фактичні дані стосовно вмісту компонентів в гноті у початковому стані (табл. 1) та в гноті і електроді після роботи в печі гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм (рис. 2). Після використання в печі діаметр електрода зменшився за рахунок окислення до 215 мм (рис. 1).

Була розроблена двовимірна скінченна елементна модель дифузії у поперечному перерізі гнотового електрода (рис. 3). У гноті ($r < R_{\text{гн}} = 23$ мм) задавали початкову концентрацію (вміст)

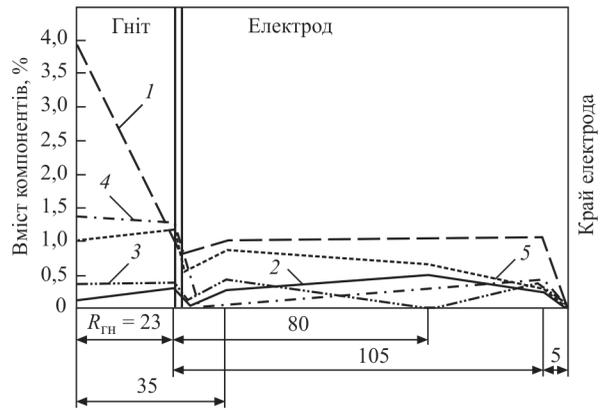


Рис. 2. Розподіл вмісту компонентів в перерізі гнота і електрода з вихідним діаметром 350 мм; 1 — Cu; 2 — K; 3 — Cr; 4 — Ba; 5 — Ti

кожного компонента (табл. 1), в решті електрода ($23 \text{ мм} < r < 105 \text{ мм}$) — початкову концентрацію прирівнювали нулю.

Через відсутність даних стосовно значень коефіцієнтів дифузії в графіті розглянутих компонентів при високих температурах було зроблено припущення, що коефіцієнти дифузії від температури електрода в діапазоні температур $30 \dots 4000 \text{ }^\circ\text{C}$ можуть бути визначені як усереднені. Термін роботи електрода було задано 3 год, виходячи з того, що через деякий час від початку роботи електрода в печі в результаті дифузії вміст компонентів гнота і електрода відповідає вказаному на рис. 2. В результаті проведених чисельних експериментів визначали коефіцієнти дифузії для кожного компонента за умови максимального збігу з експериментальними даними за розподілом вмісту компонента за радіусом електрода наприкінці його роботи. Ітеративний підбір коефіцієнтів дифузії виконували за найменших квадратичних відхилень [6]:

$$\sum_{i=1}^n (f_i - f_x)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $(f_i - f_x)^2$ — квадратичне відхилення між фактичною величиною f_i і відповідною їй розрахунковою f_x ; n — число пар значень, які порівнюються.

Проводили додаткову перевірку та коригування експериментальних даних щодо розподілу вмісту компонентів в електроді. Сумарна кількість компонента (здобуток вмісту на об'єм) в електроді після 3 год роботи не повинна перевищувати початкову кількість в гноті і залишатися приблизно

Таблиця 1. Початковий вміст компонентів у гноті (склад F_0) для розрахунку коефіцієнтів дифузії, мас. %

Час, год	Cu	K	Cr	Ba	Ti
0	15,6	2,0	2,75	2,1	9,4
3	дані на рис. 2				

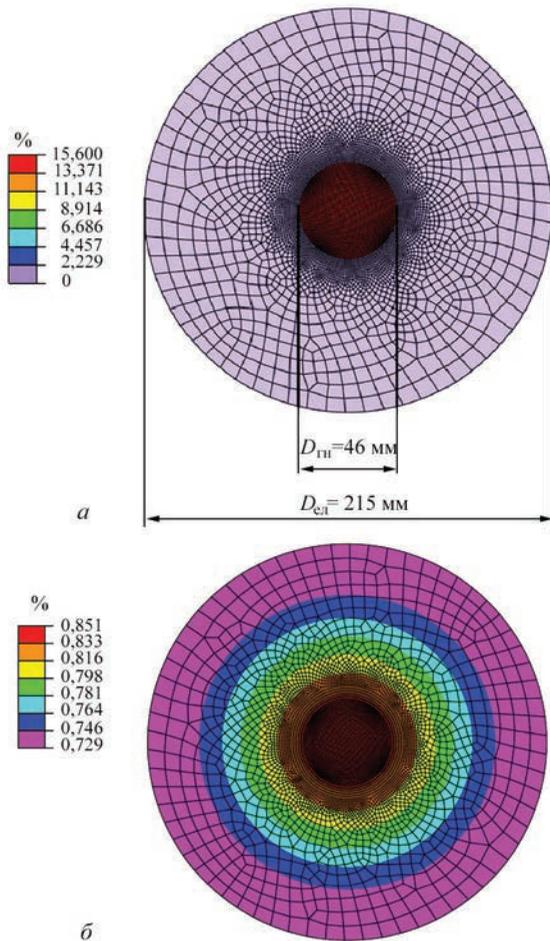


Рис. 3. Двовимірна скінченна елементна модель дифузії в поперечному перерізі гнотового електрода: *a* — концентрація Cu_3 у початковому стані; *б* — після 3 год роботи електрода

однаковою (без урахування втрат на вигорання та дифузію в зовнішнє середовище). Кількість компонента до і після роботи в печі можна оцінити за початковим вмістом компонента у гноті і залишковим сумарним вмістом в гноті та електроді.

Результати визначення коефіцієнтів дифузії компонентів гнота. За представленою методикою були підібрані ітераційним шляхом коефіцієнти дифузії для кожного компонента, що міститься у гноті. На рис. 4 представлені результати коригування експериментальних даних стосовно розподілу вмісту компонента Ti після роботи в печі за умови збереження кількості компонента до і після роботи гнотового електрода в печі, а також кілька розрахункових розподілів вмісту компонента Ti після роботи печі для різних ітерацій щодо визначення коефіцієнта дифузії із позначенням середньоквадратичного відхилення від скоригованих експериментальних даних. В результаті ітеративного підбору коефіцієнт дифузії для компонента Ti складає $540 \text{ мм}^2/\text{год}$ (середньоквадратичне відхилення — $0,024$).

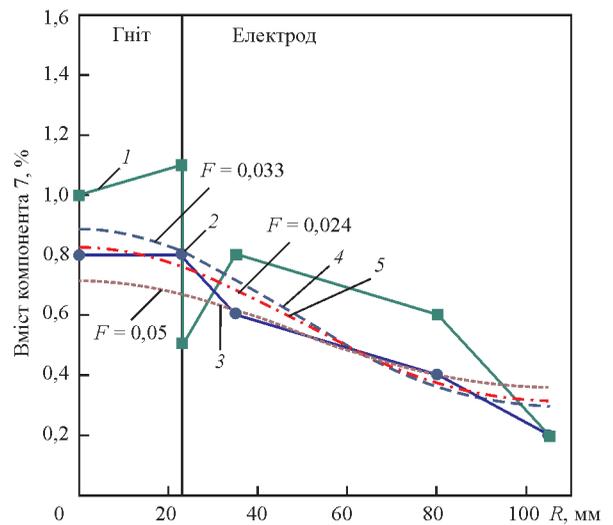


Рис. 4. Експериментальні і розрахункові розподіли вмісту компонента Ti в залежності від радіальної координати електрода з вихідним діаметром 350 мм після 3 год роботи печі: 1, 2 — початкові і скореговані експериментальні дані; 3 — розрахункові дані при $D = 650 \text{ мм}^2/\text{год}$; 4, 5 — при $D = 500 \text{ мм}^2/\text{год}$

На рис. 5, *a* представлені прогнозні розрахункові розподіли компонентів в перерізі гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм після використання в печі, діаметр якого зменшився за рахунок обгорання до 215 мм у відповідності до визначених коефіцієнтів дифузії. Можна побачити, що розподіли всіх компонентів достатньо рівномірні з невеликим підвищенням до центру електрода.

На основі визначених розрахункових значень коефіцієнтів дифузії компонентів та різних вихідних їх концентрацій у гноті було проведено моделювання процесу дифузії для прогнозної оцінки можливого розподілу їх вмісту у гнотових електродах збільшеного діаметра (508 та 600 мм) після 3 год роботи в печі. Результати моделювання (рис. 5, *б*, *в*) показали, що вихідна концентрація компонентів у гноті електродів збільшеного діаметра, як в електроді діаметром 350 мм, не забезпечила розподілу рівномірного вмісту цих компонентів по всьому поперечному перерізі графітових електродів. В перерізі електрода, ближче до його зовнішньої поверхні, вміст компонентів (крім компонента Cu) через 3 год роботи залишається майже нульовим, що є негативним фактором для забезпечення ефективної роботи електрода.

Враховуючи те, що в результаті моделювання отримано досить низький вміст компонентів в електродах збільшених діаметрів (508 та 600 мм) після 3 год роботи в печі, було вирішено для цих діаметрів електродів збільшити вихідну концентрацію (вміст окремих компонентів у гноті F'_0) (табл. 2).

На основі отриманих розрахункових значень коефіцієнтів дифузії компонентів та збільшених ви-

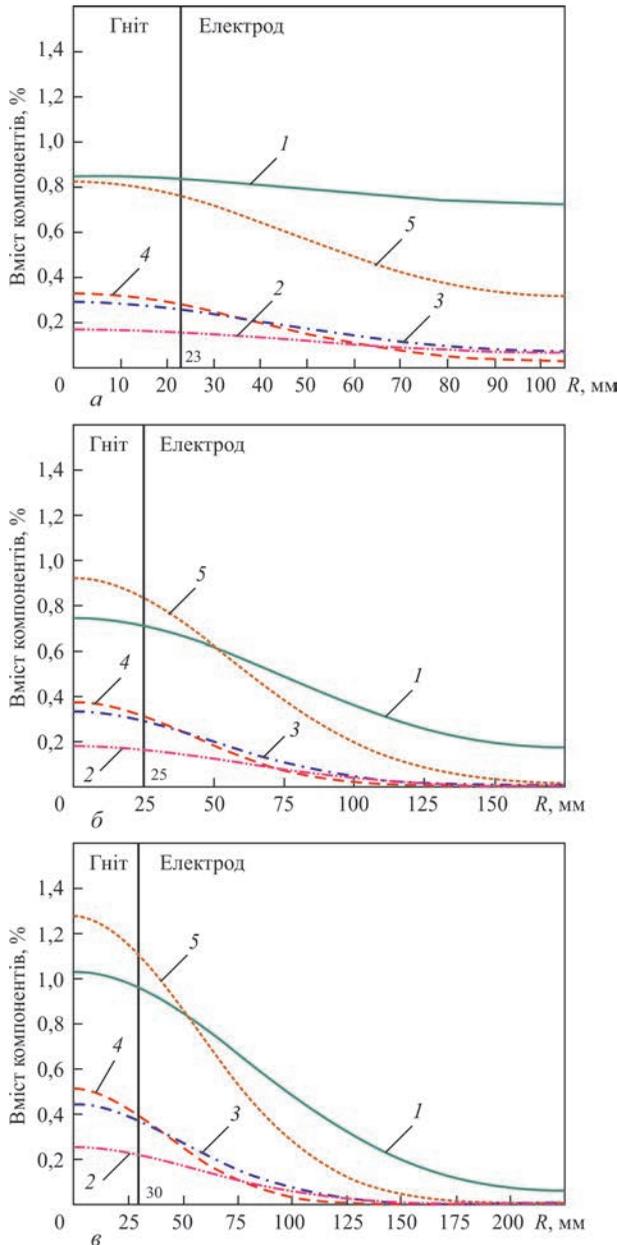


Рис. 5. Розрахункові розподіли вмісту компонентів гнота в залежності від радіальної координати електродів з вихідними діаметрами 350 мм (а), 508 мм (б), 600 мм (в) після 3 год роботи печі та компоненти і відповідні значення коефіцієнтів дифузії D , мм²/год: 1 — (Cu) 1170; 2 — (K) 620; 3 — (Cr) 460; 4 — (Ba) 290; 5 — (Ti) 540

хідних концентрацій окремих компонентів (K, Cr, Ba) у гноті було проведено моделювання процесів дифузії для оцінки можливого розподілу вмісту компонентів у гнотовому електроді діаметром 508 та 600 мм після 3 год роботи в печі (рис. 6 а, б). Результати моделювання показали, що навіть суттєве підвищення вихідного вмісту компонентів в гноті у 2...3 рази не забезпечило рівномірного розподілу цих компонентів в поперечному перерізі графітового електрода збільшеного діаметра після 3 год роботи. На периферії, ближче до зовнішньої поверхні електрода, вміст компонентів залишився дуже низьким. Тільки мідь за рахунок самого висо-

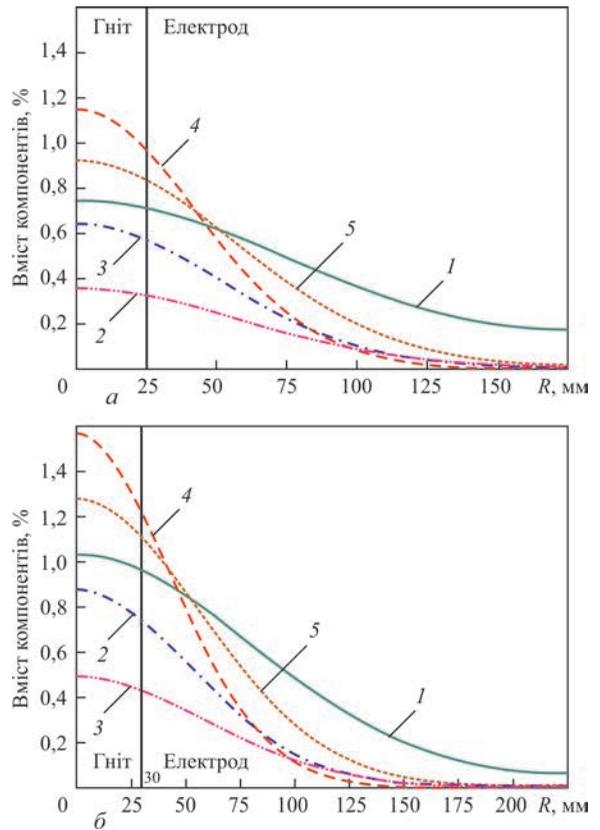


Рис. 6. Розподіл вмісту компонентів у радіальному напрямку електрода діаметром 508 (а) і 600 мм (б) після 3 год роботи та компоненти і відповідні значення коефіцієнтів дифузії D , мм²/год: 1 — (Cu) 1170; 2 — (K) 620; 3 — (Cr) 460; 4 — (Ba) 290; 5 — (Ti) 540 при збільшенні вихідного вмісту окремих компонентів у гноті

Таблиця 2. Граничні параметри збільшеного початкового вмісту компонентів F_0' у гноті електродів діаметрів 508 та 600 мм, мас. %

Час, год	Cu	K	Cr	Ba	Ti
0	15,6	4,0	5,5	6,6	9,4

Примітка. Початковий вміст компонентів в електроді дорівнює нулю.

кого значення коефіцієнта дифузії має не нульовий розподіл вмісту за всім перерізом електрода.

Висновки

1. Вперше показано, що математичне моделювання можна використовувати для прогнозування розподілу компонентів в системі гніт–електрод під час роботи в дуговій печі з урахуванням процесів дифузії.
2. Через відсутність даних стосовно значень коефіцієнтів дифузії в графіті розглянутих компонентів при високих температурах було зроблено припущення, що коефіцієнти дифузії від температури електрода в діапазоні температур 30...4000 °С можуть бути визначенні як усереднені. Термін роботи електрода було задано три години.

3. На основі використання розробленої двовимірної скінченної елементної моделі процесу дифузії компонентів в системі гніт–електрод у поперечному перерізі гнотового електрода і експериментальних даних стосовно розподілу вмісту компонентів (Cu, K, Cr, Ba, Ti) у початковому стані та після трьох годин роботи гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм, шляхом чисельних експериментів ітеративно визначені коефіцієнти дифузії для кожного компонента за умови максимального збігу за найменших квадратичних відхилень з експериментальними даними при завершенні роботи електрода в дуговій печі постійного струму.

4. На основі визначених розрахункових значень коефіцієнтів дифузії компонентів та різних вихідних їх концентрацій у гноті було проведено моделювання процесу дифузії для прогновної оцінки можливого розподілу їх вмісту у гнотових електродах збільшеного діаметра (508 та 600 мм) після трьох годин роботи в печі. Результати моделювання показали, що навіть суттєве підвищення вихідного вмісту компонентів у гноті у 2...3 рази не забезпечило рівномірного розподілу вмісту цих компонентів в поперечному перерізі графітових електродів збільшеного діаметра, і на периферії, ближче до зовнішньої поверхні електрода, вміст компонентів через 3 год роботи близький до нуля. Тільки мідь за рахунок досить високого вмісту в

гноті та високого коефіцієнта дифузії має не нульовий розподіл вмісту по перерізу електрода.

5. Вважати за необхідне продовжити роботи щодо математичного моделювання процесів дифузії в системі гніт–електрод стосовно до дугових сталеплавильних печей.

References

1. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Braginets, V.I. et al. (2016) Saving electricity on arc DC steelmaking furnaces with graphitized wick electrodes. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 58–64. hDOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.01.09>
2. Paton, B. E., Bogachenko, O. G., Kyiko, S. G. et al. (2021) Experience of application of graphitized wick electrodes in an industrial arc steel-making furnace. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 48–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>
3. Hua-jun Guo, Xin-hai Li, Xin-ming Zhang et al. (2007) Diffusion coefficient of lithium in artificial graphite, mesocarbon microbeads, and disordered carbon. *New Carbon Materials*, **1**, 7–11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(07\)60006-7](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(07)60006-7)
4. Persson, K., Sethuraman, V. A., Hardwick, L.J. et al. (2010) Lithium diffusion in graphitic carbon. *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**(8), 1176–1180. DOI: <https://doi.org/10.1021/jz100188d>
5. Wang, Z., Ratvik, A. P., Grande, T., Selbach, S.M. (2015) Diffusion of alkali metals in the first stage graphite intercalation compounds by vdW-DFT calculations. *The Royal Society of Chemistry Advances*, **5**, 15985–15992. DOI: <https://doi.org/10.1039/c4ra15529g>
6. Dedenko, L. G., Kerzhentsev, V. V. (1977) *Mathematical processing and presentation of experimental results*. Moscow, Moscow State University Publ. House [in Russian].

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF COMPONENT DIFFUSION IN A WICK-GRAPHITE ELECTRODE SYSTEM IN INDUSTRIAL DC ARC STEEL MELTING FURNACE OF DSP PS-12 TYPE

O.V. Makhnenko, O.S. Kostenevich, G.Yu. Saprykina, O.G. Bogachenko, I.O. Goncharov, I.O. Neilo
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

The work shows the possibility of using the method of mathematical modeling to predict the distribution of chemical elements in the «wick-electrode» system when operating in an arc steel-melting furnace, allowing for the diffusion processes. The coefficients of diffusion for each component were determined on the basis of the developed two-dimensional finite element model of the process of component diffusion in this system, and taking into account the experimental data on the residual distribution of the component content in the cross-section of the wick electrode. These coefficients were used to conduct modeling of the diffusion process in order to assess the possible distribution of the component content in larger-diameter wick electrodes and to demonstrate the modeling results, taking into account different initial concentrations. 6 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: arc steel-melting furnaces, graphitized wick electrodes, specific electrical resistance, components, concentration, diffusion, mathematical modeling

Отримано 09.01.2024

Отримано у переглянутому вигляді 08.08.2024

Прийнято 23.12.2024

СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

Передплата доступна
у друкованому
та цифровому форматах!
ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Тел.: (38044) 205-23-90; E-mail: journal@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com;
<https://patonpublishinghouse.com>