

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.12

УДК 669.1

Ю.Г. Качан, д.т.н., професор

В.Ю. Міщенко, асистент, m.vlad.u@i.ua

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕРВАЛІВ ЩОДО МОЖЛИВИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ШИХТИ ПРИ ОДЕРЖАННІ ФЕРОСПЛАВІВ

У даній статті проведений літературний аналіз можливих значень електричних, теплових і фізичних параметрів шихти при одержанні феросплавів, що залежать від температури. Визначені конкретні інтервали коливання значень питомого електричного опору, теплопровідності та теплоємності в різних діапазонах температур для шихти, що використовується у феросплавному виробництві. Встановлені межі коливання насипної щільності шихти в залежності від її компонентного складу.

Ключові слова: шихта; феросплави; питомий електричний опір; теплоємність; теплопровідність; щільність шихти; інтервали коливання.

In this article, a literature analysis of the possible values of the electrical, thermal, and physical parameters of the charge during the production of temperature-dependent ferroalloys is carried out. Specific intervals of variation of values of specific electrical resistance, thermal conductivity and heat capacity in different temperature ranges for the charge used in ferroalloy production are determined. The limits of fluctuations of the bulk density of the charge depending on its component composition are established.

Keywords: charge; ferroalloys; specific electrical resistance; heat capacity; thermal conductivity; charge density; oscillation intervals.

Постановка проблеми

Феросплави виплавляють в руднотермічних печах (РТП) різної конструкції та потужності, характер протікаючих процесів в яких визначається їх електричними, теплофізичними і геометричними параметрами. Подібність електричних режимів плавки робило можливим використання однієї і тієї ж печі у різних випадках. Технологічні процеси, що відбуваються у ванні останньої є енергоємними і дуже різноманітними. Деякі з них протікають безперервно, а інші — функціонують циклічно до повного проплавлення завантажених матеріалів. Найважливішим параметром печі є електричний опір ванни, який залежить від таких факторів, як питомий опір компонентів шихти, кількість і параметри електродів, геометричні розміри та інше.

Шихта для виплавки феромарганцю складається з марганцевої руди або концентрату, коксу, вапняку та залізовмісних металічних домішок [1]. Майже всі РТП відносяться до об'єктів прямого нагріву. Теплова енергія виділяється безпосередньо в їх ваннах у результаті активного опору шихти електричному струму, який надходить у ванну через вугільні або графітові електроди, та в результаті згорання коксу, який є складовою шихти. В подальшому відбуваються процеси теплопередачі і перерозподілу теплоти в об'ємі матеріалу, що розплавляється [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [3—5] розглядається розробка алгоритмічної моделі функціонування руднотермічної печі, яка враховує специфіку протікання взаємопов'язаних між собою електричних, теплових та хімічних процесів при одержанні феросплавів. Вхідними даними для зазначеної моделі є: геометричні розміри печі; відстань між електродами та глибина їх занурення у шихту, значення напруги на них та електричні, теплові й фізичні параметри шихти [6].

Як зазначено вище, на енергетичні показники роботи печі впливають електричні й теплові параметри шихти, які змінюються в залежності від її складу й температури нагріву. А саме: питомий електричний опір (ПЕО), масова теплоємність, питома щільність та коефіцієнт теплопровідності. Визначенню залежності питомого електричного опору шихти та шихтових матеріалів [7—9] від температури присвячені праці таких науковців як Гасик М.И., Жданов А.В.,

Мисик В.Ф., Толимбеков Л.Б. Теплові параметри розглядаються в публікаціях Панова Е.Н. та Мисика В.Ф. [10, 11], однак при технологічних розрахунках зазвичай використовуються усереднені значення цих параметрів [12]. Однак слід зазначити, що останні дуже різняться і залежать від таких факторів, як співвідношення відсоткового складу компонентів та місця знаходження їх родовищ.

Формулювання мети дослідження

Тож, для забезпечення адекватності згаданої вище моделі в режимі її налаштування на конкретний процес необхідно визначити інтервали можливих значень зазначених параметрів завантаженої в неї шихти. В подальшому в оптимізаційній задачі розглядаються всі можливі комбінації їх дискретних значень у вищезазначених попередньо межах, і визначається та з них, яка забезпечує мінімальну похибку прогнозування моделі.

Викладення основного матеріалу

Для різного відсоткового складу шихти, що представлений в табл. 1 з роботи [13] взяті експериментальні залежності її електричного опору від температури. Вони свідчать, що найбільший вплив на питомий електричний опір (ПЕО) шихти має співвідношення між провідними (коксик) та мало провідними її частинами, тобто від вмісту у рудній складовій відновлювальних елементів (Mn, Fe), кількості флюсу та виду марганцеворудної сировини. Встановлено, що ПЕО шихт змінюється на кілька порядків в інтервалі температур 20—1300 °С до моменту закінчення їх розм'якшення і початку плавлення. Тобто, в різних температурних зонах руднотермічної печі він не однаковий, що суттєво впливає на техніко-економічні показники процесу одержання марганцевих сплавів.

Таблиця 1. Математичні залежності ПЕО різного складу шихти, необхідної для отримання феромарганцю від температури

Номер зразка	Кількість, %		
	Марганцева сировина	Вапняк	Коксик
1	77,80	10,14	12,07
	$\lg \rho = -(2,127 \cdot 10^{-22}) \cdot t^8 + (1,043 \cdot 10^{-18}) \cdot t^7 - (2,027 \cdot 10^{-15}) \cdot t^6 + (1,990 \cdot 10^{-12}) \cdot t^5 - (1,054 \cdot 10^{-9}) \cdot t^4 + (3,003 \cdot 10^{-7}) \cdot t^3 - (3,819 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0017 \cdot t + 0,359$		
2	73,98	12,58	13,44
	$\lg \rho = -(2,95 \cdot 10^{-25}) \cdot t^9 + (1,108 \cdot 10^{-21}) \cdot t^8 - (2,307 \cdot 10^{-18}) \cdot t^7 + (2,563 \cdot 10^{-15}) \cdot t^6 - (1,638 \cdot 10^{-12}) \cdot t^5 + (6,028 \cdot 10^{-10}) \cdot t^4 - (1,212 \cdot 10^{-7}) \cdot t^3 + (1,186 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - (4,856 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0,971$		
3	87,35	-	12,65
	$\lg \rho = -(3,212 \cdot 10^{-13}) \cdot t^4 - (7,246 \cdot 10^{-9}) \cdot t^3 + (1,329 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0064 \cdot t + 0,526$		
4	84,89	0,27	14,85
	$\lg \rho = (3,153 \cdot 10^{-13}) \cdot t^4 - (1,164 \cdot 10^{-8}) \cdot t^3 + (1,738 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0072 \cdot t + 1,376$		
5	69,73	16,79	13,48
	$\lg \rho = -(2,074 \cdot 10^{-9}) \cdot t^3 + (1,858 \cdot 10^{-6}) \cdot t^2 - (9,323 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0,757$		
6	76,35	12,65	10,99
	$\lg \rho = -(7,668 \cdot 10^{-15}) \cdot t^5 + (2,765 \cdot 10^{-11}) \cdot t^4 - (3,631 \cdot 10^{-8}) \cdot t^3 + (1,826 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,003 \cdot t + 0,56$		

На основі вищезазначених залежностей був проведений розрахунок конкретних значень ПЕО шихти для дискретних значень температур, результати якого представлені в табл. 2, де числа від 1 до 6 відповідають номерам зразків та їхньому відсотковому складу шихти, що представлені в таблиці вище. Встановлені інтервали коливання цього параметра в дискретних межах температури, що ілюстровані діаграмою (рис. 1).

Таблиця 2. Значення ПЕО шихти різного відсоткового складу

Температура, °С	ПЕО шихти різного відсоткового складу, Ом·м					
	1	2	3	4	5	6
20	2,055	9,230	2,531	7,324	5,492	3,217
100	1,051	9,249	1,024	6,565	4,796	2,564
200	0,536	9,033	0,520	3,440	4,255	2,762
300	0,358	8,967	0,397	2,919	3,883	3,368
400	0,275	9,021	0,412	3,431	3,542	3,852
500	0,267	8,581	0,520	4,782	3,139	3,743
600	0,390	7,479	0,717	6,784	2,626	2,994
700	0,808	5,952	0,970	8,419	2,015	2,003
800	1,604	4,082	1,150	7,870	1,378	1,168
900	1,747	2,146	1,067	4,780	0,816	0,622
1000	0,766	0,846	0,690	1,630	0,407	0,311
1100	0,182	0,309	0,277	0,270	0,166	0,145
1200	0,050	0,100	0,061	0,019	0,054	0,059
1300	0,015	0,002	0,007	0,000	0,013	0,018

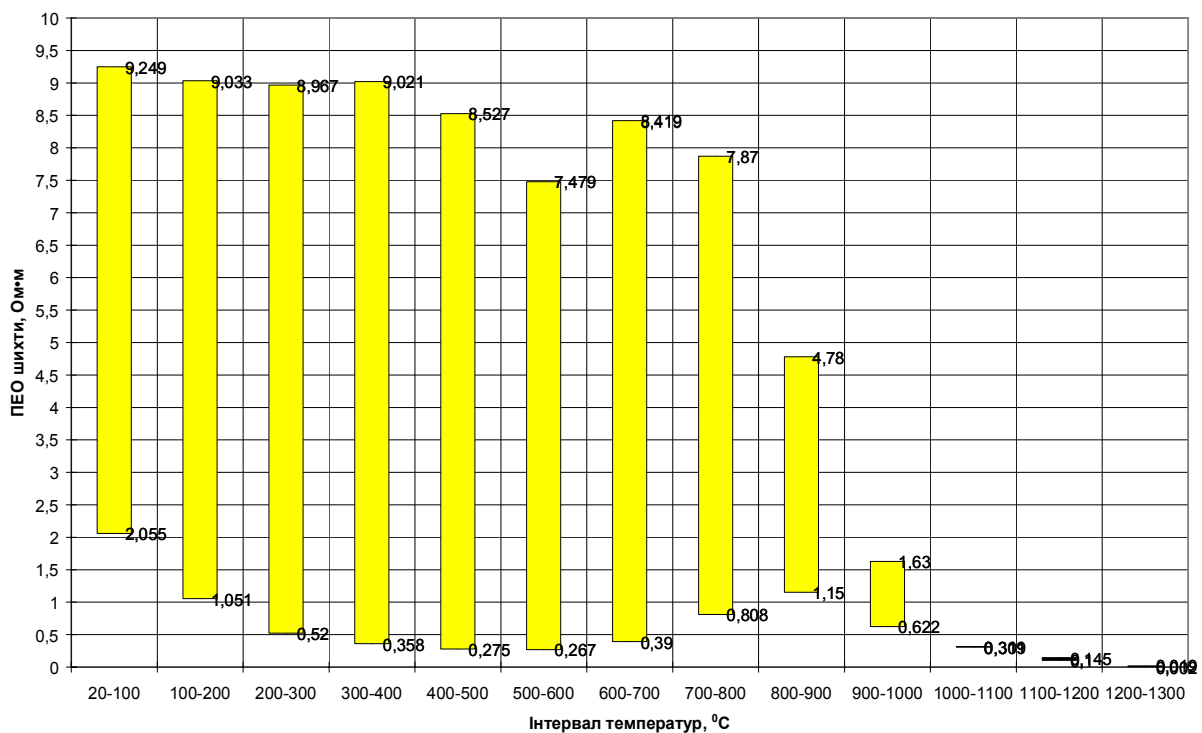


Рис. 1. Діапазон значень ПЕО шихти для різного її відсоткового складу в інтервалі температур

Отже, якщо розглядати шихту в цілому, то інтервали значення питомого електричного опору від температури коливаються в межах від 2,055 до 9,249 Ом·м за низьких температур та від 0,002 до 0,018 Ом·м в діапазоні 1200—1300 °С в залежності від відсоткового складу її компонентів.

Як було зазначено вище, теплофізичні властивості шихти характеризуються такими важливими параметрами, як теплоємність і теплопровідність. Із статей [14, 15] науковців, які проводили експериментальні дослідження цих коливань зазначених параметрів від температури для трьох комбінацій відсоткового складу шихти з різною основністю агломерату (а саме 0,5; 2,0 та 2,5), встановлені їх конкретні значення приведені в табл. 3.

Таблиця 3. Теплофізичні властивості шихти високовуглецевого феромарганцю

t, °C	Теплоємність [кДж/кг·°C]			Теплопровідність [Вт/м·°C]		
	Основність агломерату			Основність агломерату		
	0,5	2,0	2,5	0,5	2,0	2,5
100	0,646	0,575	0,846	0,938	0,734	1,215
200	0,843	0,534	0,873	1,038	0,633	1,194
300	0,914	0,486	0,873	1,124	0,65	1,177
400	1	0,498	0,89	1,273	0,704	1,225
500	1,024	0,479	0,847	1,454	0,754	1,223
600	1,033	0,461	0,807	1,805	0,82	1,194
700	1,023	0,448	0,783	1,804	0,868	1,93
800	1,015	0,441	0,782	1,741	0,886	1,229
900	1,281	0,428	0,812	1,705	0,902	1,293
1000	1,339	0,438	0,87	1,54	0,914	1,356
1100	1,358	0,45	0,95	1,541	0,957	1,429

На основі приведених в цій таблиці значень визначені межі коливання теплопровідності шихти в інтервалах зазначених температур на основі трьох основностей агломерату, які проілюстровані на рис. 2. Отже, найбільші коливання значень теплопровідності шихти присутні в діапазоні температур від 500 °C до 900 °C і становлять 0,754—1,93 Вт/м·°C.

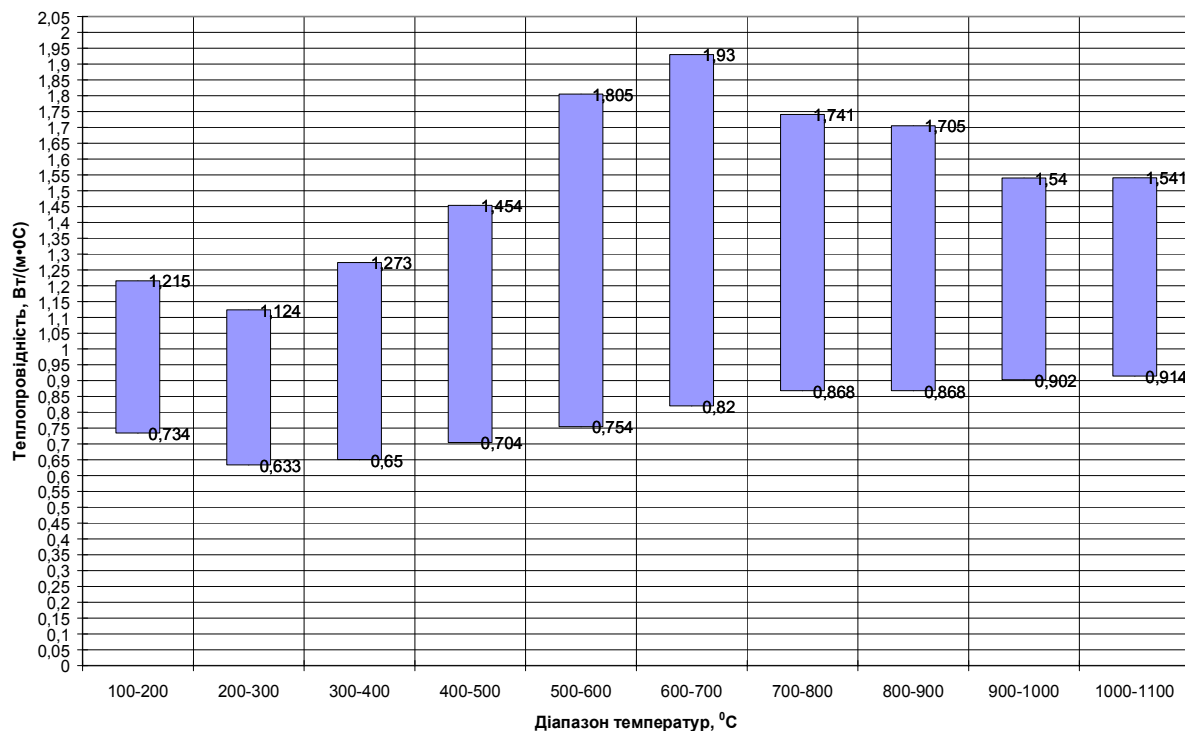


Рис. 2. Діапазони значень теплопровідності шихти за різних температур отриманих на основі трьох різних основностей агломерату

Що ж до теплоємності, яка напряму впливає на енергоємність процесу отримання марганцевих сплавів, межі її коливань також встановлені на основі даних табл. 3. Вони представлені на рис. 3. Тож найбільші коливання значень теплоємності шихти притаманні високим температурам.

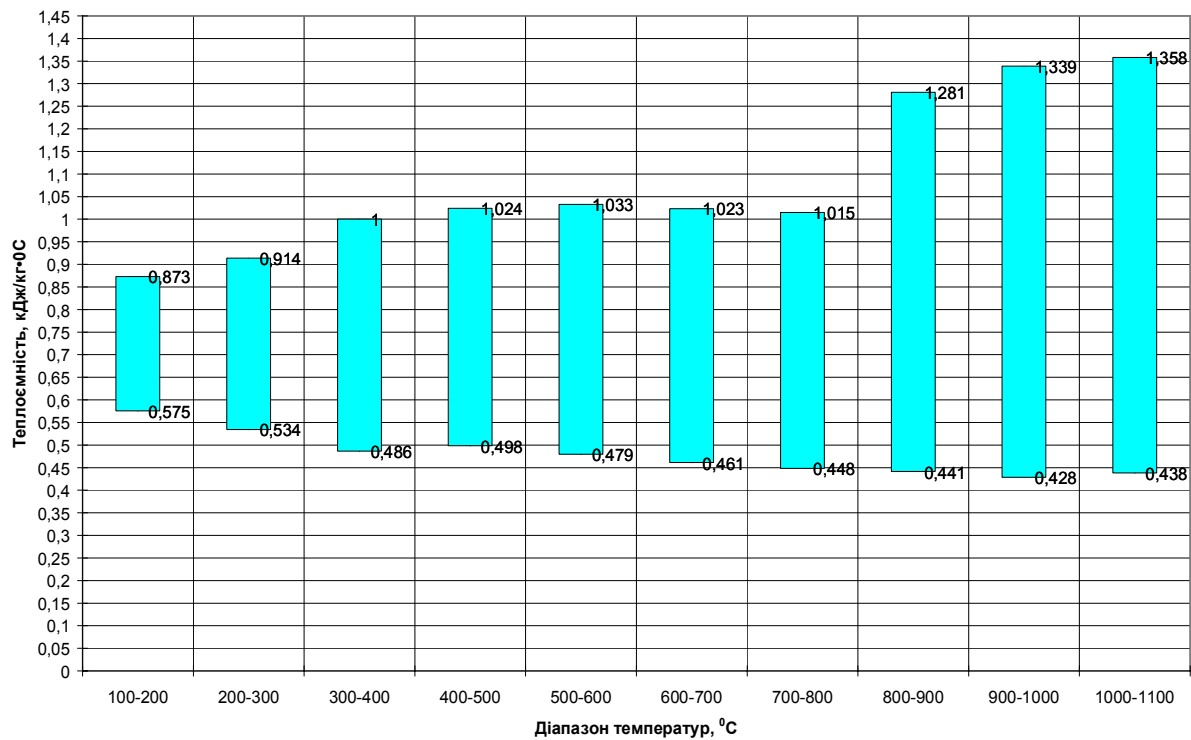


Рис. 3. Діапазон значень теплоємності шихти за різних температур, отримані на основі трьох різних основностей агломерату

Серед вхідних параметрів комплексної моделі роботи руднотермічної печі є також насипна щільність шихти, яка теж має свої межі коливання, однак відомі тільки межі її компонентів. Як зазначає автор [12], останні знаходяться в таких інтервалах: 2000—2100 кг/м³ для марганцевої руди; 550—600 кг/м³ для коксу; 1500—1800 кг/м³ для сталльної стружки витої та 1800—2200 кг/м³ для меленої; 1600—1700 кг/м³ і 600—720 кг/м³ для вапняку та вапна відповідно. Середньозважене значення щільності шихти пропонується визначати за допомогою формули

$$\rho = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3 + \dots + a_n \cdot b_n,$$

де b_1, b_2, b_3, b_n — значення щільності компонентів шихти, кг/м³; a_1, a_2, a_3, a_n — доля відповідних компонентів шихти відносно одиниці.

Підставляючи в неї спочатку мінімальні, а потім максимальні значення щільності кожного компонента, отримуємо межі коливання останнього для конкретної шихти в цілому. Результати розрахунків представлені в табл. 4, де числа від 1 до 6 відповідають номерам зразків та їхньому відсотковому складу шихти, що наведенні в табл. 1.

Таблиця 4. Межі коливання питомої щільності шихти для різного її відсоткового складу

Значення	Питома щільність шихти, кг/м ³					
	1	2	3	4	5	6
Мінімальне	1784,6	1754,8	1816,6	1783,8	1737,4	1789,8
Максимальне	1878,6	1848,1	1910,3	1876,4	1830,6	1884,3

Розглянутий параметр є одним із вхідних в моделі і використовується лише на початку розрахунків за запропонованим алгоритмом. Просідання матеріалу під час плавки враховується зменшенням обсягу зайнятих елементарних об'ємів на кожному часовому кроці.

Отже, кожний із розглянутих параметрів має свої інтервали коливань. Деякі (питомий електричний опір, теплопровідність та теплоємність) мають великий діапазон значень і суттєво залежать від температури, а інші, як щільність, значно менший інтервал.

Висновки

Аналіз літературних джерел показав, що багато наукових праць присвячено вивченню залежності зміни електричних та теплофізичних властивостей шихти від температури експериментальним шляхом. Межі коливання цих значень дуже великі і неоднозначні та залежать від багатьох факторів, а саме: відсотковий склад шихти, хімічний склад електропровідних компонентів (марганцева руда) та місця виготовлення відновників (напівкокс, кокс, вугілля). Однак цієї інформації достатньо для проведення більш точних технологічних розрахунків щодо зазначених властивостей при різних температурах та складових шихти, з яких виплавляють певні марки феросплавів. Тож для постановки оптимізаційної задачі щодо мінімізації можливої похибки прогнозу запропонованої моделі можна визначити їх конкретні інтервали коливань.

В подальшому обранні значення параметрів будуть використовуватися як вхідні дані в комплексній математичній моделі роботи руднотермічної печі, яка дає змогу в динаміці відслідковувати електричні та теплові процеси, що безпосередньо пов'язані між собою і протікають під час виплавки феросплавів.

Список використаної літератури

1. Гасик, М. И., Лякишев Н. П. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. М. : СП Интермет Инжиниринг. 1999. 764 с.
2. Качан Ю.Г., Ліуш Ю.Б., Міщенко В.Ю. Алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі. *Вісник ХНУ*. 2018. № 3 (261). С. 19–22.
3. Качан Yu. H., Mishchenko V.Yu. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. № 3. P. 138–145.
4. Mishchenko V.Yu., Качан Yu. H. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*. №2. 2019. P. 51–57.
5. Качан Ю.Г., Міщенко В.Ю. Визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі. *СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті*. №23. (2020). Дніпро: НМетАУ –ІВК «Системні технології». 2020. С. 53–62.
6. Качан Ю.Г., Міщенко В.Ю. Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю. *СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті*. №25. (2022). Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології». 2022. С. 75–84.
7. Толымбеков Л.Б. Разработка технологии выплавки ферросиликомарганца из окомкованного высококремнистого марганцевого сырья: *дис. ... канд. техн. наук*. Екатеринбург. 2014.
8. Мусина И.Б. Разработка технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома с использованием каменного угля Борлинского месторождения: *дис. ... канд. техн. наук*. 05.16.02. Караганда. 2009. 112 с.
9. Качан Ю.Г., Міщенко В.Ю. Щодо змінювання питомого електричного опору шихти під час виплавки високо вуглецевого феромарганцю. *Металургія: Збірник наукових праць*. Запоріжжя: ЗДІА. 2017. Вип. 2 (38). С. 131–133.
10. Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Чирка Т.В. и др. Оценка теплопроводности сыпучих углеродистых материалов по величине удельного электрического сопротивления. *НТУУ «КПУ» Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. С. 5–9.
11. Панов Е.В., Буряк В.В., Голчанская В.М. и др.. Результаты исследования теплопроводности дисперсных углеродных материалов. *Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Хімічна інженерія»*. 2011. №1(7). С. 63–68.
12. Мысик В.Ф., Жданов А.В., Павлов В.А. Металлургия ферросплавов: технологические расчеты : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2018. 536 с.
13. Жданов А.В. Исследование металлургических характеристик марганцеворудного сырья различных месторождений: *дис. ... канд. техн. наук*. Екатеринбург. 2008.
14. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П. Теплофизические свойства шихт высокоуглеродистого ферромарганца с офлюсованным агломератом. *Металлургическая теплотехника. Сб.научн. трудов*. Днепропетровск: ПП Грек О.С. 2006. С. 157–161.

15. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П. Теплофизические свойства шихт передельного силикомарганца. *Металлургическая теплотехника. Сб. научн. трудов.* Днепропетровск: Пороги. 2004. С. 153–156.

DETERMINATION OF INTERVALS REGARDING POSSIBLE VALUES OF CHARGE PARAMETERS WHEN PRODUCING FERROALLOYS
Kachan Yu., Mishchenko V.

Abstract

The energy performance of the ore-thermal furnace is affected by the electrical and thermal parameters of the charge, which vary depending on its composition and heating temperature. Namely: specific electrical resistance (SER), mass heat capacity, specific density and coefficient of thermal conductivity. Many scientists experimentally established the mathematical dependence of these parameters on temperature. However, in order to ensure the adequacy of the complex model of the ore-thermal furnace in the mode of its adjustment for a specific process, it is necessary to determine the intervals of possible values of the specified parameters of the charge loaded into it. In the future, the optimization problem considers all possible combinations of their discrete values within the previously mentioned limits, and the one of them that provides the minimum prediction error of the model is determined. If we consider the charge as a whole, then the intervals of the value of the specific electrical resistance depending on the temperature range from 2.055 to 9.249 Ohm·m at low temperatures and from 0.002 to 0.018 Ohm·m in the range of 1200-1300°C, depending on the percentage composition of its components. The largest fluctuations in the thermal conductivity values of the charge are present in the temperature range from 500 °C to 900 °C and are 0.754—1.93 W/m·°C. The largest fluctuations in the heat capacity values of the charge are characteristic of high temperatures. Among other input parameters of the complex model of the operation of the ore-thermal furnace, there is also the bulk density of the charge, which also has its fluctuation limits, but only the limits of its components are known. The formula for calculating the density of the charge as a whole is proposed and its maximum and minimum values are established. The obtained information is sufficient to carry out more accurate technological calculations regarding the specified properties at different temperatures and components of the charge from which certain grades of ferroalloys are smelted. Therefore, in order to set an optimization problem regarding the minimization of the possible forecast error of the proposed model, it is possible to determine their specific oscillation intervals. In the further selection of the parameter values, they will be used as input data in the complex mathematical model of the ore-thermal furnace operation, which makes it possible to dynamically monitor the electrical and thermal processes that are directly related to each other and occur during the smelting of ferroalloys.

References

- [1] Gasik M. I., Lyakishev N.P. (1999). *Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov [Theory and technology of electrometallurgy of ferroalloys]*. Moskva: SP Intermet Inzhiniring. [in Russian].
- [2] Kachan Yu.H., Liush Yu.B., Mishchenko V.Yu. (2018). Alhorytm rozrakhunku temperaturnoho polia vanny rudnotermichnoi pechi [Algorithm for calculating the temperature field of the ore-thermal furnace bath]. *Visnyk KhNU*. № 3 (261). (pp. 19–22) [in Ukrainian].
- [3] Kachan Yu. H., Mishchenko V.Yu. (2019). Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. *Naukovyi Visnyk NHU*. № 3. (pp. 138–145) [in English].
- [4] Mishchenko V.Yu., Kachan Yu.H. (2019). Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*. №2. (pp. 51–57) [in English].
- [5] Kachan Yu.H., Mishchenko V.Yu. (2020). Vyznachennia obsiahiv rozplavu ta shlaku pid chas plavky v ferospлавnii pechi [Determining the volume of melt and slag during melting in a fer-

- roalloy furnace]. *SUCHASNI PROBLEMY METALURHII. Naukovi visti.* № 23. Dnipro: NMe-tAU –IVK «Systemni tekhnolohii». (pp. 53–62) [in Ukrainian].
- [6] Kachan Yu.H., Mishchenko V.Yu. (2022). Mozhlivosti zmeshennia obsiahiv elektrospozhyvannia rudnotermichnoiu pichchiu [Possibilities of reducing electricity consumption with an ore thermal furnace]. *SUCHASNI PROBLEMY METALURHII. Naukovi visti.* №25. Dnipro: UDUNT – IVK «Systemni tekhnolohii». (pp. 75–84) [in Ukrainian].
- [7] Tolymbekov L.B. (2014). Razrabotka tekhnologii vyplavki ferrosilikomarganca iz okomkovanogo vysokokremnistogo margancevogo syr'ya [Development of technology for smelting ferrosilicomanganese from pelletized high-silicon manganese raw materials]. *Dissertaciya na na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.* Ekaterinburg. [in Russian].
- [8] Musina I.B. (2009). Razrabotka tekhnologii vyplavki vysokouglerodistogo ferrohroma s ispol'zovaniem kamennogo uglya Borlinskogo mestorozhdeniya [Development of a technology for smelting high-carbon ferrochromium using hard coal from the Borlinskoye deposit]. *Diss. kand. tekhn. nauk: 05.16.02.* Karaganda P. 112 [in Russian].
- [9] Kachan Yu.H., Mishchenko V.Yu. (2017). Shchodo zminiuvannia pytomoho elektrychnoho oporu shykhty pid chas vyplavky vysoko vuhletsevoho feromarhantsiu [Regarding the change in the specific electrical resistance of the charge during the smelting of high-carbon ferromanganese]. *METALURHIIA: Zbirnyk naukovykh prats.* Zaporizhzhia: ZDIA. Vyp. 2 (38). (pp.131–133) [in Ukrainian].
- [10] Panov E.N., Vasil'chenko G.N. & Chirka T.V. (2013). Ocenka teploprovodnosti sypuchih uglerodistykh materialov po velichine udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya [Evaluation of the thermal conductivity of bulk carbonaceous materials by the magnitude of the electrical resistivity]. *NTUU «KPU» Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'.* (pp. 5–9) [in Russian].
- [11] Panov E.V., Buryak V.V. & Golchanskaya V.M. (2011). Rezultaty issledovaniya teploprovodnosti dispersnykh uglerodnykh materialov [The results of the study of thermal conductivity of dispersed carbon materials]. *Visnik NTUU «KPI» Seriya «Himichna inzheneriya.* №1(7). (pp. 63–68) [in Russian].
- [12] Mysik V.F., Zhdanov A.V., Pavlov V.A. (2018). Metallurgiya ferrosplavov: tekhnologicheskie raschety : uchebnoe posobie [Metallurgy of ferroalloys: technological calculations: textbook] Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta. [in Russian].
- [13] Zhdanov A.V. (2018). Issledovanie metallurgicheskikh harakteristik margancevorudnogo syr'ya razlichnykh mestorozhdenij [Study of the metallurgical characteristics of manganese ore raw materials from various deposits]. *Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.* Ekaterinburg.[in Russian].
- [14] Ilchenko K.D., Morozenko E.P. (2006). Teplofizicheskie svoystva shiht vysokouglerodistogo ferromarganca s oflyusovannym aglomeratom [Thermophysical properties of charges of high-carbon ferromanganese with fluxed agglomerate]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sb.nauchn. trudov.* Dnepropetrovsk: PP Grek O.S. (pp. 157–161) [in Russian].
- [15] Ilchenko K.D., Morozenko E.P. (2004). Teplofizicheskie svoystva shiht peredel'nogo silikomarganca [Thermophysical properties of charge silicomanganese charges]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sb.nauchn. trudov.* Dnepropetrovsk: Porogi. (pp. 153–156) [in Russian].