

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВАННИ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ

Метою розробки алгоритму є створення комплексного підходу в моделюванні процесу виплавки феросплавів з урахуванням взаємопов'язаних між собою електричних і теплових процесів, що відбуваються у ванні руднотермічної печі. Розглянуто спосіб розбиття робочого простору печі на елементарні об'єми, геометричні центри яких слугують розрахунковими точками. Представлені формули для визначення значень задіяних величин та параметрів.

Ключові слова: руднотермічна піч, елементарний об'єм, температурне поле.

YU.H. KACHAN, YU.B. LIUSH, V.YU. MISHCHENKO

Zaporizhzhia State Engineering Academy

ALGORITHM OF CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE BATH OF ORE-THERMAL FURNACE

The purpose of developing the algorithm is to create a comprehensive approach in the simulation of the process of smelting ferroalloys, taking into account the interconnected electrical and thermal processes occurring in the bath of an ore-thermal furnace. The article deals with the way of breaking the working space of the furnace into elemental volumes, whose geometric centers serve as settlement points. Formulas for determining the values of the quantities and parameters involved are presented.

Keywords: ore-thermal furnace, elemental volume, temperature field.

Вступ

Руднотермічні печі (РТП) є печами прямого нагріву і використовуються для отримання феросплавів, карбідів, кремнію, фосфору і інших продуктів. Технологічні процеси, що відбуваються в них, дуже різноманітні. Одні протікають безперервно, а інші потребують повного проплавлення завантажених матеріалів. Теплова енергія, яка витрачається на фазові переходи і відновлювальні процеси, виділяється при проходженні електричного струму через струмопровідне середовище. Перетворення електричної енергії в теплову відбувається в зонах з різними агрегатними станами матеріалів.

Сучасні електродугові і руднотермічні печі є досить складними установками з різноманітним електромеханічним обладнанням. Вони складаються з джерела живлення (пічного трансформатора), власне печі (ванни з електродами) і короткої мережі, що з'єднує їх між собою. На відміну від дугових печей, в руднотермічних печах перетворення електричної енергії в теплоту відбувається не тільки в дузі, але і безпосередньо в тих матеріалах, які розплавляються [1].

Аналіз досягнень та постановка проблеми

В печі має місце змішаний режим перетворення електричної енергії в теплову. Розтікання електричного струму в руднотермічній ванні було предметом вивчення протягом багатьох минулих років. Цьому питанню присвячено багато теоретичних і експериментальних досліджень. М. С. Максименко, Ф. Я. Цибакин, Д. А. Діомідовський, Р. А. Сисоян, П. В. Сергійєв і Р. Ф. Платонов вивчали розподіл струму в однофазній та трифазній ваннах на електролітичних моделях. В. Т. Жердев більшого значення надає вивченню розподілу струму безпосередньо у діючих печах. При цьому питанню розрахунку температурного поля ванни РТП приділено недостатньо уваги.

Тому головним при розробці алгоритмічної моделі руднотермічної печі є створення комплексного підходу щодо моделювання, який би враховував електричні і теплові процеси, що безпосередньо взаємопов'язані між собою, та протікають при виплавці феросплавів й давав можливість отримати температурне поле печі у будь який момент часу.

Викладення основного матеріалу

Як зазначено в [2], для того, щоб розрахувати температурне поле робочого простору ванни РТП необхідно взяти до уваги те, що виділення теплоти відбувається не тільки за рахунок перетворення електричної енергії в теплову, а також завдяки теплоті згорання коксика, що входить до складу шихтових матеріалів. При цьому треба врахувати подальші процеси теплопередачі, які безперервно відбуваються між елементарними об'ємами на які поділена ванна печі. Тому розглянемо ці питання більш детально.

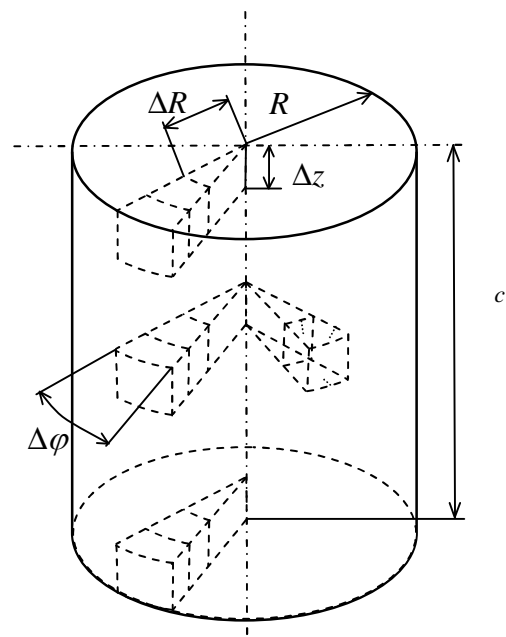


Рис. 1. Розбиття ванни руднотермічної печі на елементарні об'єми

Щоб змодельовати процес розподілення енергії та розрахувати температурне поле ванни руднотермічної печі, перш за все, необхідно розбити її внутрішню область на елементарні об'єми. Для цього існує багато способів, але нами обраний та дещо змінений метод, що базується на системі циліндричних координат. Він був використаний раніше для побудови динамічної моделі температурного поля в електричному теплоакумлюючому перетворювачі [3].

Геометрично ванну руднотермічної печі, де відбувається процес плавки, можна представити у вигляді циліндра з висотою H та радіусом R . Розіб'ємо його на ряд елементарних об'ємів у вигляді сектор з сторонами R , z та кутом θ , як представлено на рис. 1. Подальші розрахункові точки розташуємо в геометричних центрах кожного елементарного сектора.

За представленим на рис. 2 алгоритмом для визначення температурного поля ванни руднотермічної печі в динаміці необхідно розрахувати температуру в кожному елементарному об'ємі печі в будь-який момент часу.

Вхідними даними для алгоритму є початкові значення таких параметрів шихти як: питомі щільність та електричний опір, коефіцієнт теплопровідності, масова теплоємність, які визначаються залежно від складу шихти та її температури.

Визначення введеної кількості теплоти за рахунок електричного струму в кожний елементарний об'єм проводиться за певний проміжок часу $\Delta\tau$. Знаючи шляхи розтікання струму та його значення у цих напрямках в плавильній ванні з урахуванням елементарних об'ємів, на які поділена піч, можна визначити енергію, яка виділилась в кожному з них.

Наступним кроком є розрахунок значення температури кожного елементарного об'єму, який можна зробити за допомогою формули зміни теплоємності:

$$\Delta J_{R,\varphi,z} = c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{(R,\varphi,z)} (t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} - t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau}) \Delta V, \quad (1)$$

де c_m – масова теплоємність елементарного об'єму, Дж/(кг К);

ρ – питома щільність розрахункового об'єму, кг/м³;

$t_{R,\varphi,z}^{\tau}, t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau}$ – розрахункова температура в момент часу τ та $\tau+\Delta\tau$ у центрі елементарного об'єму, К;

R, φ, z – координати центру.

На даному етапі розрахунків зміна теплоємності відбулася за рахунок внесення електричної енергії, тобто $J_{R,\varphi,z} = Q_{w(R,\varphi,z)}$. Тоді для знаходження температури елементарного об'єму формула (1) прийме вигляд:

$$t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} = \frac{Q_{w(R,\varphi,z)}}{c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{R,\varphi,z} \Delta V_{R,\varphi,z}} + t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau} \quad (2)$$

В алгоритмі враховується той факт, що при певній температурі відбудеться процес згорання коксика, який супроводжується додатковим виділенням теплоти. Тому в блоці 3 передбачена перевірка відповідності температури елементарного об'єму температурі його самозаймання. Якщо це «Так», то робиться перехід до блоку 4, якщо ж «Ні» до блоку 6. Процес горіння коксика в різних елементарних об'ємах ванни буде не одночасним. Там, де це відбувається, треба розрахувати кількість додатково введеної теплоти (Блок 4) за наступною формулою:

$$Q_{v(R,\varphi,z)} = m_{R,\varphi,z} \times q, \quad (3)$$

де $Q_{v(R,\varphi,z)}$ – теплота, що виділилась при згоранні коксика;

$m_{R,\varphi,z}$ – маса коксика, що знаходиться в елементарному об'ємі;

q – питома теплота згорання коксика.

При зазначеному виділенні додаткової теплоти зміниться теплоємність об'єму і відповідно значення

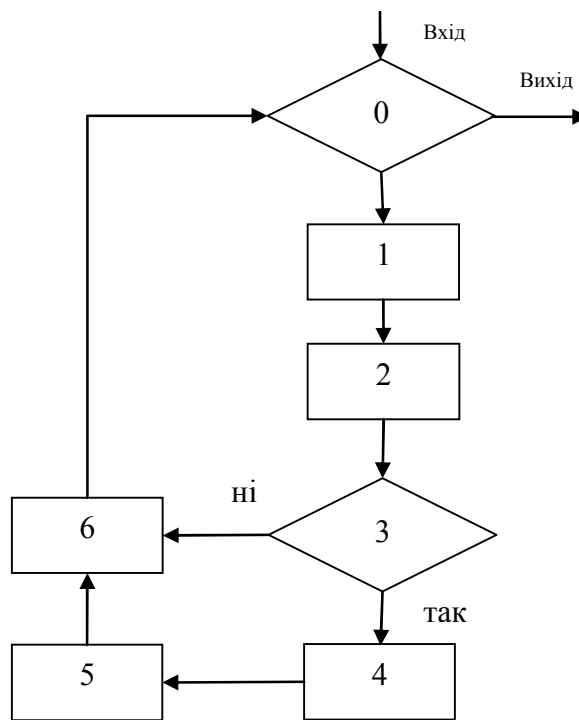


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі в динаміці:

0 – Перевірка розрахункового часу; 1 – Визначення введеної кількості теплоти за рахунок електричного струму в кожний елементарний об'єм протягом часу $\Delta\tau$; 2 – Розрахунок значення температури кожного елементарного об'єму; 3 – Перевірка відповідності температури елементарного об'єму температурі самозаймання коксика; 4 – Розрахунок введеної кількості теплоти в кожний елементарний об'єм за рахунок згорання коксика; 5 – Перерахунок температури кожного елементарного об'єму; 6 – Розрахунок температури кожного елементарного об'єму з урахуванням процесу теплопередачі між ними

температури, тому необхідно зробити відповідний перерахунок (Блок 5):

$$t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} = \frac{Q_{vi}}{c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{R,\varphi,z} \Delta V_{R,\varphi,z}} + t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau} \quad (4)$$

Процес теплопередачі між елементарними об'ємами (Блок 6) розраховується за допомогою рівняння теплового балансу для розглянутого елементарного об'єму, який визначається як:

$$\Delta J_{R,\varphi,z} = \sum_I^{VI} Q_i, \quad (5)$$

де $Q_I, Q_{II}, Q_{III}, Q_{IV}, Q_V, Q_{VI}$ – кількість теплоти, що увійшло або вийшло з елементарного об'єму за час через відповідні індексами грані;

$J_{R,\varphi,z}$ – зміна теплоємності останнього. Індекси – номер грані елементарного об'єму.

Так, згідно з гіпотезою Фур'є [4], кількість теплоти, що входить в елементарний об'єм, який зі сторони $-i$ грані можливо представити у вигляді:

$$Q_i = -\lambda_i \text{grad} t_i S_i \Delta \tau, \quad (6)$$

де λ_i – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності в $-i$ напрямленні, Вт/(м·К);

$\text{grad} t_i$ – градієнт температури в $-i$ напрямленні, (К/м);

S_i – площа $-i$ грані, м^2 ;

$\Delta \tau$ – проміжок часу, с.

Розглянемо більш детально величини, що зазначені в рівнянні (6). Так еквівалентний коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda_I = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R,\varphi,z+\Delta z}^{\tau}}{2}, \quad (7)$$

$$\lambda_{II} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R-\Delta R,\varphi,z}^{\tau}}{2}, \quad (8)$$

$$\lambda_{III} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R,\varphi+\Delta\varphi,z}^{\tau}}{2}, \quad (9)$$

$$\lambda_{VI} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R,\varphi-\Delta\varphi,z}^{\tau}}{2}, \quad (10)$$

$$\lambda_V = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R+\Delta R,\varphi,z}^{\tau}}{2}, \quad (11)$$

$$\lambda_{VI} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^{\tau} + \lambda_{R,\varphi,z-\Delta z}^{\tau}}{2}. \quad (12)$$

А градієнти температур в $-i$ му напрямку мають вигляд:

$$\Delta t_I = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R,\varphi,z+\Delta z}^{\tau}}{\Delta z}, \quad (13)$$

$$\Delta t_{II} = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R-\Delta R,\varphi,z}^{\tau}}{\Delta R}, \quad (14)$$

$$\Delta t_{III} = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R,\varphi+\Delta\varphi,z}^{\tau}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2} (2\Delta R_k + \Delta R_{k+1})}, \quad (15)$$

$$\Delta t_{IV} = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R,\varphi-\Delta\varphi,z}^{\tau}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2} (2\Delta R_k + \Delta R_{k+1})}, \quad (16)$$

$$\Delta t_V = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R+\Delta R,\varphi,z}^{\tau}}{\Delta R}, \quad (17)$$

$$\Delta t_{VI} = \frac{t_{R,\varphi,z}^{\tau} - t_{R,\varphi,z-\Delta z}^{\tau}}{\Delta z}. \quad (18)$$

При цьому площі поверхонь, що обмежують елементарний об'єм:

1. Верхньої та нижньої поверхні:

$$S_1 = S_{VI} = \frac{\Delta V}{\Delta z} \quad (19)$$

2. Бічних поверхонь:

$$S_I = S_{IV} = \Delta R \times \Delta z \quad (20)$$

3. Радіусних поверхонь:

$$S_{II} = \frac{2\pi \times \sum_{\gamma=1}^k \Delta R_k}{N_\varphi} \Delta z, \quad (21)$$

$$S_{II} = \frac{2\pi \times \left(\sum_{\gamma=1}^k \Delta R_k + \Delta R_{k+1} \right)}{N_\varphi} \Delta z. \quad (22)$$

Тож алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі за проміжок часу складається з двох циклів. Знаючи значення температури елементарного об'єму після введення в нього електричної енергії (Блок 1 та Блок 2), відбувається перевірка на досягнення температури самозаймання коксика та, якщо це має місце, враховується додаткове введення теплоти за рахунок процесу його горіння (Блоки 4, 5). Після цього моделюється процес розтікання теплоти за рахунок теплопередачі (Блок 6) та перераховується діюче значення температури.

Вихідною інформацією розрахункового алгоритму, що розглядається є значення температур елементарних об'ємів після електричних, хімічних та теплових процесів, що відбулися в них за проміжок часу. Після чого повертаємося на початок всього алгоритму і розраховуємо значення температур для наступного кроку. Отже, розрахувавши значення температур в усіх заданих точках ванни руднотермічної печі, ми отримуємо розподіл температурного поля в об'ємі на усіх проміжках часу технологічного процесу і отримаємо динамічне зображення зміни температурного поля печі в процесі виплавки феросплавів.

Висновки

Представлений алгоритм для розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі під час виплавки феросплавів враховує важливі аспекти цього складного технологічного процесу. А саме:

- внесення теплоти в об'єм ванни за рахунок електричної енергії завдяки електричному опору шихтових матеріалів;
- виділення додаткової теплоти при згоранні коксика;
- перерозподіл теплоти в об'ємі ванни руднотермічної печі за рахунок теплопередачі.

За допомогою даного алгоритму можливо отримати 3D картину температурного поля ванни печі у будь-який момент часу, тобто одержати його динаміку.

Література

1. Данцис Я. Б. Методы электрических расчетов мощных электропечей / Данцис Я. Б. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 232 с.
2. Качан Ю.Г. Щодо комплексного підходу при моделюванні роботи руднотермічної печі / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. 1 (39). – С. 94–96.
3. Качан Ю.Г. Динамическая модель температурного поля в электрическом теплоаккумулирующем преобразователе / Ю.Г. Качан, Н.А. Баташова // *Теория и практика металлургии*. Днепропетровск. – 2007. – № 6 (61). – С. 63–66.
4. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Мукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

References

1. Dantsis YA. B. Metodyi elektricheskikh raschetov moschnykh elektropetchey / Dantsis YA. B. – 2-e izd., pererab. i dop. – L. : Energoizdat, Leningr. otd-nie, 1982. – 232 s.
2. Kachan Yu.H. Shchodo kompleksnoho pidkhodu pry modeliuvanni roboty rudnotermichnoi pechi / Yu.H. Kachan, V.Iu. Mishchenko // *Metallurhiia : naukovi pratsi Zaporizkoi derzhavnoi inzhenernoi akademii*. – Zaporizhzhia : RVV ZDIA, 2018. – Vyp. 1 (39). – S. 94–96.
3. Kachan YU.G. Dinamicheskaya model temperaturunogo polya v elektricheskomo teploakkumuliruyuschem preobrazovatele / YU.G. Kachan, N.A. Batashova // *Teoriya i praktika metallurgii*. Dnepropetrovsk. – 2007. – № 6 (61). – S. 63–66.
4. Isachenko V.P. Teploperedacha / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Mukomel. – M. : Energoizdat, 1981. – 416 s.

Рецензія/Peer review : 17.04.2018 р.

Надрукована/Printed : 13.05.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Куріс Ю.В.