

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, С.В. Жук

**ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ****Вступ**

Киснево-конвертерна ванна як багатозв'язаний об'єкт є трифазною, багатокомпонентною термодинамічною системою, в якій на фоні турбулентного переносу проходять взаємозв'язані тепломасообмінні, гідродинамічні, хімічні та інші необоротні явища. Сучасний рівень розвитку вимірювальної техніки не дає змоги в агресивному високотемпературному середовищі виконувати прямий контроль швидкості проходження фізико-хімічних процесів, які визначають керовані координати об'єкта – температуру і вміст вуглецю в металі, основність та окисненість шлаку [1]. Тому вивчення, розрахунки, контроль і керування нестаціонарним режимом процесу виконуються його математичним моделюванням у реальному масштабі часу з використанням непрямої інформації, вимірювання якої можливе з достатньою точністю, надійністю і мінімально можливим запізненням.

Останнім часом внаслідок використання технології з окисненням вуглецю до малих часток (0,04–0,05 %) з наступним науглецюванням металу в ковші основна увага приділяється отриманню заданої температури металу.

У працях [2–5] проведено детальний теоретичний аналіз процесів, які відбуваються у конвертерній ванні, наведено формалізацію окремих явищ. Загальний недолік моделей керування, про які йдеться в цих публікаціях, – неадекватність описання процесів у реальних умовах, що пов'язано з припущеннями при розробці моделей.

Відома модель явищ переносу в сталеплавильній ванні [6]. Її можна використати для прогнозування стану конвертерної ванни і керування температурним режимом. Однак відсутність зворотного зв'язку істотно утруднює можливість використання моделі в реальному виробництві. На практиці як зворотний зв'язок у моделях керування температурним режимом дуття використовується хімічний аналіз газів, які відходять, або безпосередньо вимірюються

фізичні параметри ванни [7]. Обидва способи призводять до похибок, зв'язаних із впливом  $\text{CO}_2$  недопалу вапна, режимом вигорання мангану і заліза, кількістю кисню, який витрачається на реакцію допалювання  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$  у порожнині конвертера.

Отже, використання відомих моделей призводить до неоптимального керування конвертерною плавкою.

Наведені в статті дослідження проводились у Національному технічному університеті України “КПІ” за темою “Математичні моделі й алгоритми системи керування кисневим конвертером”, державний реєстраційний номер 0110U002880.

**Постановка задачі**

Метою даних досліджень є створення моделі контролю температурного режиму ванни конвертера на основі теоретичного обґрунтування процесів окиснення домішок металу і аналізів процесів тепловиділення, які при цьому відбуваються.

**Результати досліджень**

Дослідження проведено на конвертерах місткістю 160 т металургійного комбінату ВАТ “Арселорміттал, Кривий Ріг”. Продувка в процесі досліджень відбувалась таким чином. У конвертерах переплавлявся переробний чавун із вмістом (%) силіцію 0,4–1,1, мангану 0,3–0,5, сірки 0,02–0,07, фосфору 0,02–0,15 та температурою 1200–1400 °С. У завалку завантажувався металевий брухт у кількості 0–30 % від маси чавуну. Рідкий чавун із міксера подавався в 140-тонних ковшах. Як шлакоутворювальні матеріали використовувались вапно в кількості 8–15 % і плавиковий шпат – 0,1–0,5 %. Останнім часом плавиковий шпат замінювався ставролітовим концентратом. Продувка проводилась через багатосоплові фурми з п'яти сопел – одне центральне, інші розміщені під кутом осі сопла до вертикалі 15–20 градусів. Інтенсивність подання кисню становила 2,3–2,5 м<sup>3</sup>/(т·хв). Сортамент марок сталі характеризувався вмістом вуглецю 0,09–0,40 % і температурою випуску 1580–1620 °С.

Дослідження проводились на плавках точного виробництва, балансових і таких, в яких змінювались параметри за допомогою ме-

тодів планування експерименту. На всіх плавках відбиралися проби чавуну, металу і шлаку на повалках конвертера і фіксувалися вихідні параметри процесу. Частина вимірювань робилась у моменти проміжного скочування шлаку. Швидкість зневуглецювання визначалась за аналізом газів, що відходять із конвертера.

Температура металу  $t$ , °С, яка визначалась за швидкістю її зміни, становила

$$t = t_n + \int_0^{\tau_{np}} v_t d\tau, \quad (1)$$

де  $t_n$  – початкове значення температури ванни, °С;  $v_t$  – швидкість зміни температури ванни, °С/хв;  $\tau_{np}$  – тривалість продувки, хв.

Початкове значення температури ванни визначалось за формулою

$$t_n = c_1 t_q + \sum_1^3 c_2(\varphi) m_6(\varphi) + c_3 m_{вд} + c_4(f) \tau_n + \Delta t, \quad (2)$$

де  $t_q$  – температура чавуну, °С;  $m_6(\varphi)$  – маса частини брукху, що розплавився при заливці чавуну, т;  $m_{вд}$  – маса вапна, що завантажена на дно конвертера, т;  $\tau_n$  – тривалість простою конвертера, год;  $\Delta t$  – поправка за досвідом попередніх плавок, °С;  $\varphi, f$  – функції, які визначаються відповідно насипною масою брукху і тривалістю простою конвертера;  $c_1$ – $c_4$  – умовно-сталі коефіцієнти.

Маса частини брукху, що розплавився при заливці чавуну, визначалась коефіцієнтом  $c_2$ , який характеризує втрати температури металу на розплавлення брукху і залежить від його насипної маси:

$$c_2 = \begin{cases} \varphi_1 = c_5 \cdot c_6 - \text{для дрібного брукху;} \\ \varphi_2 = c_5 \cdot c_7 - \text{для брукху середньої} \\ \quad \text{консистенції;} \\ \varphi_3 = c_5 \cdot c_8 - \text{для габаритного брукху.} \end{cases}$$

Тут коефіцієнт  $c_5$  є функцією питомої теплоти  $Q_6$ , витраченої на нагрівання і розплавлення брукху, і дорівнює  $1368 \cdot 10^3$  кДж/т.

Втрати тепла випромінюванням і теплопровідністю через стінку конвертера в період простою визначаються коефіцієнтом  $c_4$ , що є нелінійною функцією від тривалості простою:

$$c_4 = \begin{cases} c_9 - \text{для } \tau_n < 0,2 \text{ год;} \\ c_{10}(\tau_n - 0,2) - \text{для } 0,2 < \tau_n < 1,0 \text{ год;} \\ c_{10}(\tau_n - 1,0) + c_{12} - \text{для } 1,0 < \tau_n < 2,0 \text{ год;} \\ c_{13}(\tau_n - 1,0) + c_{14} - \text{для } \tau_n > 2,0 \text{ год.} \end{cases}$$

Поправка за досвідом попередніх плавок визначалась за формулою

$$\Delta t = c_{15} \sqrt{t_{(n-1)}^\Phi - t_{(n-1)}^P} \text{sign}[t_{(n-1)}^\Phi - t_{(n-1)}^P], \quad (3)$$

де  $t_{(n-1)}^\Phi, t_{(n-1)}^P$  – відповідно фактичне і розраховане значення температури на  $(n-1)$ -й плавці, °С (береться значення, яке є на першій повалці);  $\text{sign}[t_{(n-1)}^\Phi - t_{(n-1)}^P]$  – функція, що набуває значення “плюс”, якщо вираз у квадратних дужках додатний, і “мінус”, якщо вираз – від’ємний;  $c_5$ – $c_{15}$  – умовно-сталі коефіцієнти.

Швидкість зміни температури ванни визначалась за балансом теплоти:

$$v_t = [Q_{CO} v_C + \gamma_1(Q_{CO_2} - Q_{CO})(1 - \gamma_{CO}) v_C + Q_{Si} v_{Si} + Q_{Mn} v_{Mn} + Q_{Fe} v_{Fe} + Q_P v_P - Q_r - \frac{60}{10^3}(q_6 + q_v + q_{в-п} + q_{ш} + q_n + q_{аш})] / cm_c, \quad (4)$$

де  $c$  – середня умовна теплоємність рідкого металу при середній протягом продувки температурі, що дорівнює  $0,88$  кДж/(кг·К);  $m_c$  – маса садки, яка чисельно дорівнює масі чавуну і брукху на плавку, т;  $v_t$  – швидкість зміни температури ванни, К/хв;  $Q_{CO}, Q_{CO_2}, Q_{Si}, Q_{Mn}, Q_{Fe}, Q_P$  – питомі стаціонарні теплові ефекти хімічних реакцій утворення відповідних оксидів вуглецю, силіцію, мангану, заліза та фосфору в робочому просторі конвертера при стандартній температурі газоподібного кисню, кДж/кг окиснюваного елемента;  $Q_r$  – кількість теплоти, що втрачається з газами, які відходять, кДж/хв;  $v_C, v_{Si}, v_{Mn}, v_{Fe}, v_P$  – масові швидкості зневуглецювання ванни, вигорання силіцію, мангану, заліза, фосфору, т/хв;  $\gamma_1$  – коефіцієнт, який характеризує використання теплоти від окиснення CO в CO<sub>2</sub> у порожнині конвертера; він дорівнює  $0,7$ ;  $q_6(\varphi), q_v, q_{в-п}, q_{ш}$  – потужність, що витрачається на нагрівання і розплавлення брукху визначеного виду  $\varphi$  по ходу продувки, вапна, вапняку і плавико-

вого шпату, кВт;  $q_n, q_{аш}(\varphi)$  – тепловий потік, що зумовлений втратою тепла з неврахованими складовими і на нагрівання активного шару футерівки конвертера протягом продувки, кВт.

Зміна питомих нестандартних теплових ефектів хімічних реакцій протягом продувки незначна і становить відносно середнього значення не більше 2%. Тому значення  $Q_{CO}$ ,  $Q_{CO_2}$ ,  $Q_{Si}$ ,  $Q_{Mn}$ ,  $Q_{Fe}$ ,  $Q_P$  – беруться сталими при середній температурі процесу відповідно 10550, 31540, 24642, 6750, 4485 і 37516 кДж/кг елемента.

Кількість теплоти, що втрачається з газами, які відходять, визначалася виразом

$$Q_r = v_c \left[ \gamma_{CO} \frac{28}{12} - (1 - \gamma_{CO}) \frac{44}{12} \right] \bar{c}_r \bar{T}_r, \quad (5)$$

де  $\bar{c}_r$  – питома теплоємність газів, які виходять із конвертера, в діапазоні температур плавки, що дорівнює 1,21 кДж/(кг·К);  $\bar{T}_r = (t_q + t_3)/2 + 273$  – середня температура газів, які відходять, К. Тут  $t_3$  – задана маркою сталі температура металу наприкінці продувки.

Вираз для потужності, що витрачається на теплову обробку брухту визначеного виду по ходу продувки, має такий вигляд:

$$q_6(\varphi) = \frac{Q_6 [1 - \beta(\varphi)]}{0,95 \cdot 60 \Delta\tau_n(\varphi)} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau_n(\varphi) m_6 [1 - \beta(\varphi)]}\right), \quad (6)$$

де  $\beta(\varphi)$  – масова частка брухту визначеного виду, що розплавився при заливці чавуну в конвертер;  $\Delta\tau_n = \frac{\Delta\tau(\varphi)}{m_6 [1 - \beta(\varphi)]}$  – питоме значення

сталі часу перехідного процесу проплавлення брухту визначеного виду, хв/т;  $\Delta\tau(\varphi)$  – стала часу перехідного процесу проплавлення брухту визначеного виду, хв.

Потужність, яка витрачалася на теплову обробку вапна, вапняку і шпату, визначалася як

$$q_j = \frac{Q_j}{0,95 \cdot 60 \Delta\tau_{nj}} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_j}{\Delta\tau_{nj} m_j}\right), \quad (7)$$

де  $Q_j$  – питома теплота, яка витрачена на засвоєння  $j$ -ї добавки сипких матеріалів і включає фізичну теплоту на нагрівання і зміну агрегатного стану, а також хімічну теплоту реакцій

перетворення добавки, кДж/т;  $\Delta\tau_{nj}$  – питоме значення сталі часу перехідного процесу засвоєння  $j$ -ї добавки сипких, хв/т;  $\tau_j$  – момент вводу  $j$ -ї добавки сипких, який вимірюється від моменту початку продувки, хв;  $m_j$  – маса  $j$ -ї добавки сипких, т.

Питомий охолоджувальний ефект вапна, вапняку і плавикового шпату відповідно становить 2510, 4820 і 2330 кДж/т·10<sup>3</sup>. Перехідний процес зміни температури ванни внаслідок охолоджувальної дії добавок сипких матеріалів вивчено нами експериментально за показаннями пірометричного пристрою безперервного вимірювання температури металу в конвертері. Ідентифікацією дослідних даних від дії регламентованих добавок отримано локальні функції температурного режиму сталеплавильної ванни, за якими визначено значення  $\Delta\tau_{nj}$ : для вапна – 0,459, вапняку – 0,880 і плавикового шпату – 0,423 хв/т.

Кількість теплоти  $q_n$  визначалася за формулою

$$q_n = \bar{q}_n + \frac{\Delta t m c}{\tau_{np}^p}, \quad (8)$$

де  $\bar{q}_n$  – середнє значення кількості теплоти з неврахованими втратами, що знижують швидкість зростання температури ванни, дорівнює 6%, кВт;  $\tau_{np}^p$  – розрахункове значення тривалості продувки, хв.

Теплота  $q_{аш}$  знаходиться у вигляді

$$q_{аш} = -\lambda_\phi \left. \frac{\partial(\Delta t)}{\partial x} \right|_{x=0} S, \quad (9)$$

де  $\lambda_\phi$  – теплопровідність футерівки, яка для смолодоломітової дорівнює 2800 Вт/(м·К);  $\left. \frac{\partial(\Delta t)}{\partial x} \right|_{x=0}$  – градієнт від гармонічної складової

температурного поля на теплоприймальній поверхні, К/м;  $S = 2\pi R_\phi L$  – площа внутрішньої поверхні футерівки конвертера по ходу її кампанії, м<sup>2</sup>;  $R_\phi$  – поточний внутрішній радіус футерівки, м;  $L$  – довжина еквівалентної циліндричної футерівки, м.

Довжина еквівалентної циліндричної футерівки і її внутрішній радіус на початку кампанії визначались із співвідношень

$$L = 0,5 S_3 / \pi R_3, \quad (10)$$

$$R_0 = 0,5 \sqrt{4R_{3,\phi}^2 - \frac{4V_{\phi}|_{N=0}}{\pi L}}, \quad (11)$$

де  $S_3$  – сумарна площа зовнішньої поверхні кожуха, м<sup>2</sup>;  $R_3$ ,  $R_{3,\phi}$  – зовнішні радіуси циліндричної частини кожуха і футерівки, м;  $4V_{\phi}|_{N=0}$  – об'єм нової футерівки, м<sup>3</sup>.

Відомо, що при  $R_{3,\phi}/R_0 < 2$  циліндричну стінку без великої похибки (менше 4 %) можна розглядати як необмежену пластину такої ж товщини.

При експлуатації конвертера робоча поверхня футерівки піддається високотемпературній хімічній і механічній дії метало-шлако-газової емульсії, що призводить до зношення цегли. Тому теплоперенос у футерівці конвертера відповідає так званим фронтовим процесам теплопровідності із зміною маси матеріалу і належить до класу нелінійних задач. Задаючи рівномірний за масою знос футерівки за плавку по ходу кампанії

$$\bar{g}_{\phi} = \frac{100dm_{\phi}}{\bar{m}_{\phi}dN} \quad (12)$$

і визначаючи елементарну масу розмитої футерівки через зміну геометричних розмірів еквівалентної циліндричної порожнини

$$dm_{\phi} = 2 \cdot 10^3 \pi R L \rho_{\phi} dR, \quad (13)$$

інтегруванням рівняння (11) у межах ( $R_0$ ,  $R_{\phi}$ ) і (0,  $N$ ) знаходили закон руху фронту зношення внутрішньої поверхні порожнини:

$$R_{\phi} = \sqrt{R_0^2 + \frac{10\bar{g}_{\phi}\bar{m}_{\phi}N}{\pi L\rho_{\phi}}}, \quad (14)$$

де  $\bar{g}_{\phi}$  – питоме середнє масове зношення футерівки за плавку, кг/100 кг чавуну;  $\bar{m}_{\phi}$  – середня за плавку маса чавуну, т;  $\rho_{\phi}$  – густина футерівки, кг/м<sup>3</sup>.

Після визначення градієнта температури по поверхні стінки записувалось по ходу напівперіоду продувки значення теплового потоку на нагрівання активного шару:

$$q_{ac} = -2\lambda_{\phi}\Delta t_* \Big|_{x=0} \sqrt{\frac{2\pi^3}{60a_{\phi}\bar{\tau}_{пл}}} R_{\phi} \times$$

$$\times L \cos\left(2\pi \frac{0,5\bar{\tau}_{пл} + \tau}{\bar{\tau}_{пл}} + \frac{\pi}{4}\right), \quad (15)$$

де  $\Delta t_* \Big|_{x=0} = \frac{t_c^3 - t_{\phi}}{2}$  – амплітуда коливань температури сталі і чавуну на вогневій поверхні футерівки, °С;  $t_c^3$  – задана температура сталі, °С;  $a_{\phi}$  – температуропровідність футерівки, м<sup>2</sup>/с;  $\bar{\tau}_{пл}$  – середня тривалість плавки, хв.

Якщо при виведенні рівняння гармонічної складової температурного поля взяти граничну умову першого роду, що виключає інерційне запізнення на границі стінки між тепловим потоком і температурним полем, то здвиг фаз дорівнюватиме нулю. Кінцеве рівняння для  $q_{аш}$  матиме вигляд

$$q_{аш} = -2\lambda_{\phi}\Delta t_* \Big|_{x=0} \sqrt{\frac{2\pi^3}{60a_{\phi}\bar{\tau}_{пл}}} R_{\phi} \times \\ \times L \cos\left(2\pi \frac{0,5\bar{\tau}_{пл} + \tau}{\bar{\tau}_{пл}}\right). \quad (16)$$

Відомо, що окиснення силіцію і мангану в конвертерній ванні завершується, наближаючись до рівноважних значень, через 0,4–0,5  $\bar{\tau}_{пл}$ . Процеси вигорання силіцію, мангану і фосфору чавуну відбуваються відповідно до екзотермічної реакції  $aR + bO_2 = R_aO_{2b} + Q_m$ , де  $R$  – елемент, що окиснюється;  $a$  і  $b$  – стехіометричні коефіцієнти;  $Q_m$  – молярний нестандартний тепловий ефект хімічної реакції утворення оксиду з участю газоподібного кисню при його стандартній температурі, середній за продувку температурі ванни і відповідних агрегатних станах вихідного і отриманого продуктів, що для силіцію, мангану і фосфору становить 690, 378 і 1163 кДж/кмоль·10<sup>3</sup>.

Рівняння перехідного процесу масо- і теплообміну при окисненні домішок чавуну киснем аналогічні кінетичному рівнянню (6) проплавлення брухту по ходу продувки ванни:

$$v_R = \frac{m_{\phi} \cdot 10^{-2}}{0,95\Delta\tau_{пR}} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau_{пR}(R_{\phi} - \gamma R_M)}\right), \quad (17)$$

$$v_{O_2R} = \frac{10bV_m m_{\phi}}{0,95aA_R \Delta\tau_{пR}} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau_{пR}(R_{\phi} - \gamma R_M)}\right), \quad (18)$$

$$q_R = \frac{10Q_m m_{\text{ч}}}{0,95aA_R 60\Delta\tau_{\text{пR}}} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau_{\text{пR}}(R_{\text{ч}} - \gamma R_{\text{М}})}\right), \quad (19)$$

де  $v_{\text{O}_2R}$  – об'ємна витрата при нормальних умовах кисню дуття для окиснення елемента  $R$  ( $R \in \text{Si, Mn, P}$ ), м<sup>3</sup>/хв;  $V_m$  – молярний об'єм ідеального газу при нормальних умовах, що дорівнює 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль;  $A_R$  – атомна маса елемента  $R$ , що окиснюється, кг/кг-атом;  $\Delta\tau_{\text{пR}}$  – питома значення сталої часу перехідного процесу окиснення елемента  $R$ , хв/%;  $R_{\text{ч}}$ ,  $R_{\text{М}}$  – масова частка елемента, що окиснюється, відповідно в чавуні й металі (покладалось  $\text{Si}_{\text{М}} = 0$ ,  $R_{\text{М}} = 0,03$ ), %;  $\gamma = 0,9$  – коефіцієнт, що характеризує вигорання елементів чавуну і дорівнює відношенню маси виплавленого металу до вихідної маси чавуну;  $q_R$  – потужність тепловиділення по ходу продувки ванни при окисненні елемента  $R$ , кВт.

Масова частка мангану в металі визначалась формулою

$$\text{Mn}_{\text{М}} = c_{16} + c_{17}\text{Mn}_{\text{ч}} - c_{18}C_3^{-1} - c_{19}t_c^3, \quad (20)$$

де  $c_{16}-c_{19}$  – умовно-сталі коефіцієнти;  $C_3$ ,  $t_c^3$  – задані значення вмісту вуглецю і температури ванни, що визначаються маркою сталі.

Чисельні значення  $\Delta\tau_{\text{пR}}$  відповідно становили для силіцію 2,05, мангану 2,59 і фосфору 40 хв/%.

Об'ємна витрата кисню дуття, що йшла на окиснення заліза, визначалась за балансом кисню

$$\begin{aligned} v_{\text{O}_2\text{Fe}} &= v\gamma_1(1 - \gamma_2) - \\ &- v_{\text{C}} \left[ \frac{22,4}{12} + (1 - \gamma_{\text{CO}}) \frac{22,4}{24} \right] 10^3 - \\ &- v_{\text{O}_2\text{Si}} - v_{\text{O}_2\text{Mn}} - v_{\text{O}_2\text{P}}, \end{aligned} \quad (21)$$

де  $\gamma_1$  – вміст кисню в дутті;  $\gamma_2$  – втрати кисню;  $\gamma_{\text{CO}}$  – ступінь допалювання СО в СО<sub>2</sub> у порожнині конвертера.

Масова швидкість вигорання заліза, т/хв, становила

$$v_{\text{Fe}} = v_{\text{O}_2\text{Fe}} \frac{56 \cdot 2}{22,4}. \quad (22)$$

Результати моделювання процесу наведено на рис. 1–4.

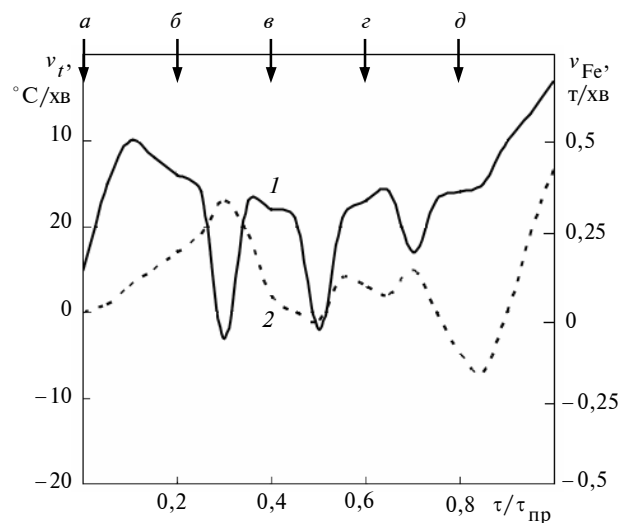


Рис. 1. Зміна швидкості, зміни температури (1) і вигорання заліза (2) ванни протягом продування: стрілки – моменти введення сипких: а – вапна 4 т; б – вапна 2 т; в – вапна 1,5 т; г – вапняку 0,75 т; д – вапняку 0,75 т

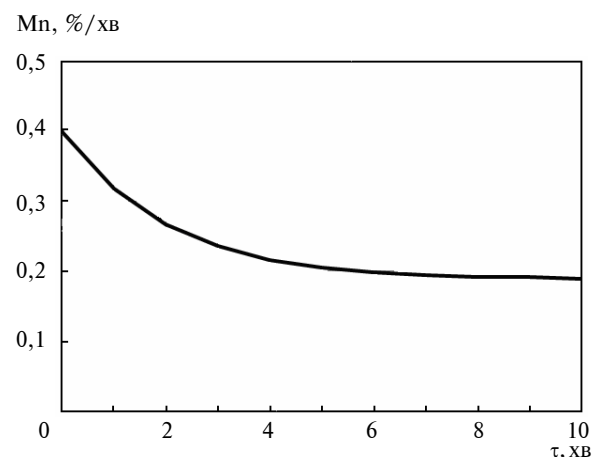


Рис. 2. Масова швидкість вигорання мангану

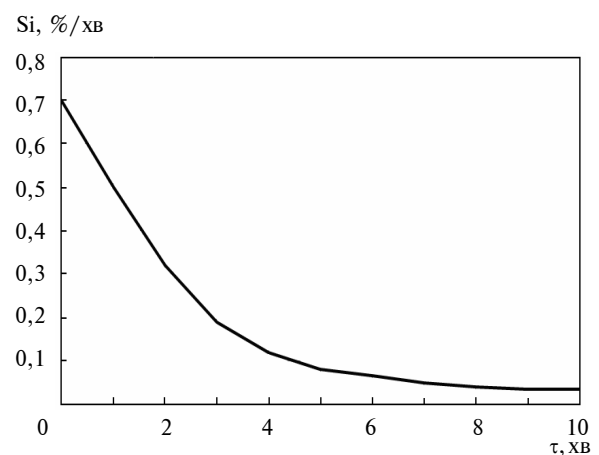


Рис. 3. Масова швидкість вигорання кремнію

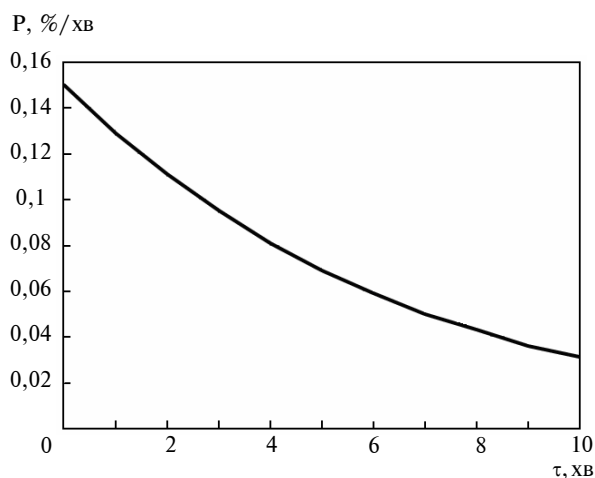


Рис. 4. Масова швидкість вигорання фосфору

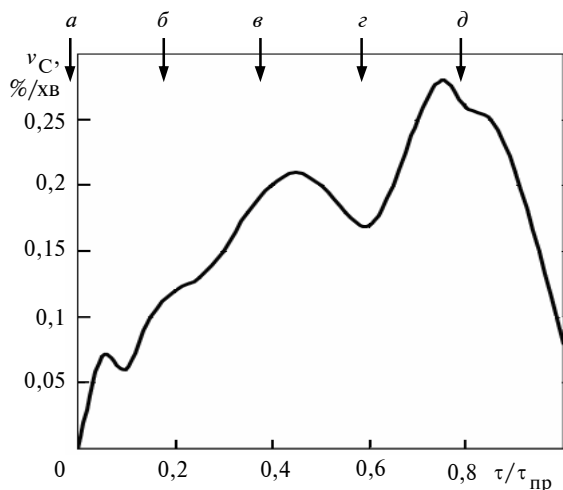


Рис. 5. Зміна швидкості зневуглецювання, яка визначена за аналізом газів, що відходять з конвертера; стрілки відповідають рис. 1

Характер зміни швидкості зневуглецювання за результатами газового аналізу наведено на рис. 5.

При моделюванні було взято такі початкові умови: хімічний склад чавуну (%) – Si = 0,7; Mn = 0,4; P = 0,15; температура чавуну – 1300 °С; задано кінцевий вміст вуглецю у сталі – C = 0,1 %, кінцеву температуру сталі – 1600 °С.

Експериментальна перевірка динамічної моделі показала задовільне відображення системою процесів, які відбуваються у ванні конвертера. Модель дає можливість безперервно по ходу продувки контролювати швидкість зневуглецювання, зміну температури і окиснення заліза.

### Висновки

Дослідження динамічного методу контролю температури конвертерної ванни, засновані на балансових і кінетичних залежностях процесу, показали, що метод дає можливість контролювати як абсолютні значення температури, так і швидкості її зміни в процесі продування. Моделювання процесу засвідчило добрий збіг розрахункових і фактичних результатів плавок.

Модель контролю температурного режиму конвертерної плавки передана ТОВ “ТРЕІ-Україна” для впровадження на конвертері № 3 ВАТ “Арселорміттал, Кривий Ріг”. Подальші дослідження будуть проводитись у напрямку розробки системи керування температурним режимом як складової частини АСКТП конвертерної плавки [8, 9].

В.С. Богушевский, С.В. Жук

#### ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

Проведен анализ существующих методов контроля температуры кислородно-конвертерной ванны. Исследованы балансовый метод контроля температуры, кинетика выгорания примесей железа, усвоения сыпучих материалов, нагрева футеровки и ее связь с изменением температуры ванны. Приведены результаты моделирования температурного режима конвертерной плавки.

V.S. Bogushevsky, S.V. Zhuk

#### A DYNAMIC MODEL OF TEMPERATURE CONTROL CONVERTER BATHS

In this paper, we analyze the existing methods of temperature control of the oxygen - converter bath. We investigate the balance method of temperature control, kinetics of burning iron impurities, assimilation of bulk materials, heating of the lining and its relation to changes in the bath temperature. Finally, we present the simulation results of converter melting under the temperature conditions.

1. *Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського. – К.: Вища шк., 2006. – 504 с.*
2. *Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Metallurgiya, 1988. – 480 с.*
3. *Математическая модель АСУ конвертерной плавкой / В.С. Богушевский, Ю.В. Оробцев, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин. – К.: НПК “Киевский институт автоматки”, 1996. – 212 с.*
4. *Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія): Підручник. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.*
5. *Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. – К.: НПО “Киевский институт автоматки”, 1992. – 168 с.*
6. *Богушевский В.С., Сергеева Е.А., Жук С.В. Модель переноса массы и теплоты в квазигомогенном приближении // Mantrifly VI Miedzynarodowej Naukowi-Praktycznej Konferencji “Naukowa Przestrzec Europy-2010”, Przemysl, 7-12, April 2010. – 19. – С. 27–32.*
7. *Богушевський В.С., Сергеева К.О. Контроль температурного режиму конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 6. – С. 75–80.*
8. *Реализация модели управления конвертерной плавкой в системе принятия решений / В.С. Богушевский, В.Ю. Сухенко, Е.А. Сергеева, С.В. Жук // Автоматика. Автоматизация. Электричні комплекси та системи. – 2010. – № 1 (25). – С. 101–105.*
9. *Bogushevsky V., Sharbatian M., Suhenko V. Automatic control of converter process // Materialy IV Mezinarodni Vedecko-Practicka Ronference “Evropska Veda XXI Stoleti-2008”, Praga, 16–30 kvetna 2008 roku. – P. 26–29.*

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
21 січня 2011 року