

УДК 669.046:536.68

Каюков Юрій Миколайович ⁽¹⁾, доцент, кандидат технічних наук
Іванов Віктор Ілліч ⁽¹⁾, старший науковий співробітник
Чепрасов Олександр Іванович ⁽¹⁾, професор, кандидат технічних наук
Радченко Юрій Миколайович ⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук

ДО УПРАВЛІННЯ МАЛООКИСНЮВАЛЬНИМ НАГРІВАННЯМ МЕТАЛУ В ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія
⁽²⁾ Національна металургійна академія, м. Дніпро

Запропоновано математичну модель оптимального управління процесом малоокиснювального нагрівання металу за умов печей камерного типу. Як критерії дій, що управляють, розглянуто витрату палива, питому витрату кисню та коефіцієнт витрати повітря, яке подають на допалювання палива. Ключові слова: піч камерного типу, метал, малоокиснювальне нагрівання, математична модель, критерії управляючих дій

Вступ. Значні витрати енергоресурсів у чорній металургії України, а також суттєве збільшення вартості енергоносіїв, спричинюють розробку та впровадження у виробництво енерго- й ресурсозберігаючих технологій [1].

Відомо [2,3], що чималої економії енергоносіїв можна досягати за реконструкції пічних агрегатів з використанням сучасних методів опалювання та пальникових пристроїв, а також вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів. У роботах [4,5], для мінімізації витрат на газоподібне паливо, а також зниження окалини металу, використовують окиснювальне нагрівання з його інтенсифікацією на завершальній стадії процесу. Оптимальні температурні режими нагрівання металу можна реалізувати в усіх типах печей нагрівального типу без суттєвого оновлення пічного обладнання [6].

Слід зазначити, що ефективним методом зниження окиснення металу є малоокиснювальне нагрівання у продуктах неповного горіння палива за коефіцієнта витрати повітря $\alpha < 1,0$. Так, під час нагрівання сталі за температури поверхні металу понад 1130...1180 К в атмосфері продуктів неповного горіння палива, що містять 1...2 % оксиду вуглецю, вигар металу знижується на 20...40 % [7].

Постановка завдання. Завданням роботи є розробка математичної моделі процесу оптимального управління малоокиснювальним нагріванням металу в печах камерного типу.

Головна частина досліджень. На відміну від відомого вирішення [8], де, як дії, що управляють малоокиснювальним нагріванням металу в печах камерного типу, застосовують витрату палива U_1 та питому витрату кисню U_2 , розгля-

дають також можливість використання коефіцієнта витрати повітря на допалювання палива U_3 .

Динаміку нагрівання металу можна описати диференціальним рівнянням

$$\frac{dT_m}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot F_m}{m_m \cdot c_m} \cdot (T_r - T_m), \quad (1)$$

де T_m , T_r – температура металу та нагрівального середовища, К, відповідно; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); F_m – площа поверхні металу, м²; m_m , c_m – маса, кг, та теплоємність металу, Дж/(кг К), відповідно; τ – час нагрівання, с.

Процес утворення окалини можна подати рівнянням Вагнера:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{[\varphi \cdot \exp(-\delta / T_m)]^2}{2M}, \quad (2)$$

де M – маса окисненого металу, кг/м²; φ , δ – константи, що залежать від складу сталі, м²·с^{0,5}, та пічної атмосфери, К, відповідно.

Значення констант φ і δ для сталі марки ст. 35, під час окиснення в атмосфері продуктів горіння доменного, коксового та природного газів за значень коефіцієнта витрати повітря $\alpha = 0,90...1,0$, наведено у роботі [9]. Константи подано у вигляді лінійної залежності від коефіцієнта витрати повітря. Вигар металу в середовищі продуктів горіння суміші зазначених газів записано як лінійну його комбінацію від «чистих» газів. Тоді, для прийнятих припущень, рівняння (2) має вигляд:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{\Omega^2}{2M}, \quad (3)$$

де

$$\Omega = (a_1 + b_1 \cdot U_3) \cdot \exp\left(-\frac{c_1 + f_1 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_1 + (a_2 + b_2 \cdot U_3) \cdot$$

$$\cdot \exp\left(-\frac{c_2 + f_2 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_2 + (a_3 + b_3 \cdot U_3) \cdot \exp\left(-\frac{c_3 + f_3 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_3$$

$a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ – коефіцієнти лінійної апроксимації значення φ для доменного, коксового та природного газів відповідно; $c_1, f_1, c_2, f_2, c_3, f_3$ – коефіцієнти лінійної апроксимації значення δ для доменного, коксового та природного газів відповідно; ξ_1, ξ_2, ξ_3 – частки зазначених газів у складі палива відповідно.

Рівняння теплового балансу робочого об'єму печі подають як

$$Q_n^p \cdot U_1 = U_1 \cdot Q_{x,n} \cdot (1 - k_p) + Q_{п.в} + \alpha \cdot F_m \cdot (T_r - T_m) + K \cdot F_{кл} \cdot T_r + U_1 \cdot c_{п.г} \cdot T_r \cdot V_{п.г} \cdot (1 - k_p), \quad (4)$$

де $Q_n^p, Q_{x,n}$ – нижча теплота горіння палива та його хімічний недопал, Дж/м³, відповідно; $Q_{п.в}$ – постійні втрати теплоти, Вт; k_p – коефіцієнт рекуперації теплоти; K – коефіцієнт теплопередачі через кладку печі, Вт/(м²·К); $F_{кл}$ – площа поверхні кладки печі, м²; $c_{п.г}, V_{п.г}$ – теплоємність, Дж/(кг·К), та об'єм продуктів горіння, м³/м³, відповідно.

Об'єм продуктів горіння можна надати у вигляді співвідношення

$$V_{п.г} = V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^n + U_3 \cdot Z_1 \cdot (V_{O_2}^0 - U_2) + (U_3 - 1) \cdot (V_{O_2}^0 - U_2) \cdot k, \quad (5)$$

де $V_{CO_2}^0, V_{H_2O}^0$ – об'єм діоксиду вуглецю та води за $U_3 = 1,0$ у продуктах повного горіння палива, м³/м³, відповідно; $V_{N_2}^n$ – об'єм азоту в паливі, м³/м³; $V_{O_2}^0$ – об'єм кисню, що надходить з повітрям за $\alpha = 1,0$, м³/м³; Z_1 – відношення об'ємного вмісту азоту та кисню у повітрі; k – коефіцієнт, що залежить від значення U_3 : за $U_3 \leq 1,0$ $k = 0$, за $U_3 > 1,0$ $k = 1,0$.

Значення хімічного недопалу $Q_{x,n}$ подають як лінійну залежність від коефіцієнта витрати повітря [10]:

$$Q_{x,n} = [Q_{1,x} - (U_3 - 1) \cdot Q_{1,x}] \cdot k + [Q_{2,x}^1 - (U_3 - 1) \cdot Q_{2,x}^1] \cdot (1 - k), \quad (6)$$

де $Q_{1,x} = Q_x^1 / (U_{3max} - 1)$; $Q_{2,x} = Q_x^{U_{3min}} / (1 - U_{3min})$; $Q_x^{U_{3min}} = (12627 V_{CO} + 10785 V_{H_2}) \cdot 10^3$; $Q_x^{U_{3min}}$ – хімічний недопал палива за мінімального коефіцієнта витрати повітря $U_3 = U_{3min}$; V_{CO}, V_{H_2} – об'єм оксиду вуглецю та водню за неповного горіння палива $U_3 = U_{3min}$, м³/м³, відповідно; $Q_{1,x}, Q_{2,x}$ –

хімічний недопал палива за $U_3 = 1,0$ і $U_3 < 1,0$, Дж/м³, відповідно.

За експериментальними даними роботи [11] значення $Q_{1,x}$ складає 30...35 % хімічного недопалу палива за $U_3 = 0,90$.

Температуру нагрівального середовища визначають із рівняння теплового балансу (4) з урахуванням рівнянь (5) і (6)

$$T_r = \frac{U_1 \cdot [Q_n^p - Q_{x,n} \cdot (1 - k_p)] - Q_{п.в} + \alpha \cdot F_m \cdot T_m}{\alpha \cdot F_m + K \cdot F_{кл} + U_1 \cdot c_{п.г} \cdot V_{п.г} \cdot (1 - k_p)}. \quad (7)$$

Вартість палива та кисню, що витрачають для нагрівання металу, можна обчислити за формулою

$$\theta = \int_0^{\tau_k} (U_1 \cdot S_{пал} + U_1 \cdot U_2 \cdot S_{O_2} + U_1 \cdot V_{с.п} \cdot S_{с.п}) \cdot 10^{-3} d\tau, \quad (8)$$

де τ_k – заданий час нагрівання, с; $V_{с.п}$ – питома витрата стислого повітря, що використовують для допалювання продуктів неповного горіння палива, м³/м³; $S_{пал}, S_{O_2}, S_{с.п}$ – ціна палива, кисню та стислого повітря, грн./1000 м³, відповідно.

Питому витрату стислого повітря $V_{с.п}$ за $U_3 < 1,0$ подають як лінійну залежність, що вибрано відповідно до рекомендацій роботи [10]:

$$V_{с.п} = 0,5 n_{с.п} \cdot Z_2 \cdot [V_{CH}^1 + (1 - U_3) \cdot V_{CH}^1] \cdot (1 - k), \quad (9)$$

де $n_{с.п}$ – коефіцієнт витрати стислого повітря; Z_2 – відношення об'ємного вмісту повітря та кисню; $Z_2 = 4,76$; V_{CH}^1 – сумарний об'єм оксиду вуглецю (CO) та водню (H₂) у продуктах неповного горіння палива за $U_3 = 1,0$, м³/м³; $V_{CH}^1 = (V_{CH} + V_{H_2}) / (1 - U_{3min})$.

Згідно з даними роботи [11] значення V_{CH}^1 складає 30...35 % від сумарного об'єму CO та H₂ у продуктах неповного горіння палива за $U_3 = 0,90$.

Розв'язували задачу нагрівання металу від початкового $T_m(0) = T_{м,поч}$, $M(0) = M_{поч}$ до кінцевого стану $T_m(\tau_{кін}) = T_{м,кін}$ протягом заданого часу $\tau_{кін}$ за мінімальної витрати на його реалізацію. Як критерій оптимальності приймали вартість палива, кисню та стислого повітря на нагрівання металу з урахуванням вартості його втрат з окатиною

$$I = \int_0^{\tau_k} (U_1 \cdot S_{пал} + U_1 \cdot U_2 \cdot S_{O_2} + U_1 \cdot V_{с.п} \cdot S_{с.п}) \cdot 10^{-3} d\tau + E \int_0^{\tau_k} \frac{\Omega^2}{2M} d\tau, \quad (10)$$

де E – коефіцієнт, що визначає втрати металу від окиснення, $E = 0,001F_m \cdot (S_m - S_{ок})$; S_m , $S_{ок}$ – ціна металу та окалини відповідно.

Поставлену задачу вирішували з використанням принципу максимуму Понтрягіна, згідно до якого оптимальним є припустиме управління U_1^* , U_2^* , U_3^* , яке на кожний момент часу забезпечує максимальне значення Понтрягіана Π [12]:

$$\Pi = \sum P_i \frac{dX_i}{d\tau} \quad (11)$$

Для задачі, що розглядають, Понтрягіан Π з урахуванням співвідношень (2), (4), (8) і (10) можна записати:

$$\Pi = P_1 \cdot \mu \cdot \left\langle \frac{U_1 \cdot [Q_H^p - Q_{x.H} \cdot (1 - k_p)] - Q_{п.в} + \alpha \cdot F_m \cdot T_m}{\alpha \cdot F_m + K \cdot F_{кл} + U_1 \cdot c_{п.г} \cdot V_{п.г} \cdot (1 - k_p)} - T_m \right\rangle + \frac{P_2 \cdot \Omega^2}{2M} + (P_3 \cdot U_1 \cdot S_{пал} + U_2 \cdot S_{O_2} + V_{с.п} \cdot S_{с.п}) \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

де P_i – пов'язані змінні, які визначають із співвідношення

$$\frac{dP_i}{d\tau} = -\frac{\partial \Pi}{\partial X_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Розв'язують рівняння (13) за постійних коефіцієнтів з урахуванням роботи [12] й отримують

$$P_1 = \left[P_{1,поч} - \frac{F_2 \cdot C_2}{F_1 \cdot X_2(\tau_{кін})} \right] \cdot \exp(F_1 \cdot \tau) + \frac{F_2 \cdot C_2}{F_1 \cdot X_2(\tau_{кін})}, \quad (14)$$

де $P_{1,поч}$ – початкове значення P_1 ;

$$F_1 = \mu \cdot \left[1 - \frac{\alpha \cdot F_m}{\alpha \cdot F_m + K \cdot F_{кл} + U_1 \cdot c_{п.г} \cdot V_{п.г} \cdot (1 - k_p)} \right];$$

$$F_2 = \frac{\Omega \cdot \Omega'}{T_m^2};$$

$$\Omega' = (a_1 + b_1 \cdot U_3) \cdot \exp\left(-\frac{c_1 + f_1 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_1 \cdot (c_1 + f_1 \cdot U_3) +$$

$$+ (a_2 + b_2 \cdot U_3) \cdot \exp\left(-\frac{c_2 + f_2 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_1 \cdot (c_2 + f_2 \cdot U_3) +$$

$$+ (a_3 + b_3 \cdot U_3) \cdot \exp\left(-\frac{c_3 + f_3 \cdot U_3}{T_m}\right) \cdot \xi_1 \cdot (c_3 + f_3 \cdot U_3);$$

$$P_2 = E; \quad (15)$$

$$P_3 = -1. \quad (16)$$

Розв'язання рівнянь (1) і (3), що одержано аналогічним чином, мають вигляд:

$$T_m = \left(T_{м,поч} - \frac{F_3}{F_1} \right) \cdot \exp(-F_1 \cdot \tau) + \frac{F_3}{F_1}, \quad (17)$$

$$\text{де } F_3 = \frac{\mu \cdot \left\langle U_1 \cdot [Q_H^p - Q_{x.H} \cdot (1 - k_p)] - Q_{п.в} \right\rangle}{\alpha \cdot F_m + K \cdot F_{кл} + U_1 \cdot c_{п.г} \cdot V_{п.г} \cdot (1 - k_p)};$$

$$M = (M_{поч}^2 + \tau)^{0,5}. \quad (18)$$

Розв'язання наведеної задачі виконували чисельним методом. Час нагрівання поділяли на ряд інтервалів $\Delta\tau$ та визначали змінну P_1 , температуру металу T_m та масу окисненого металу M у кінці інтервалів. Знайдені значення були початковими для наступних інтервалів часу. За початкових значень зазначених параметрів та умови максимуму величини (12) знаходили оптимальні на кожному інтервалі часу управляючі дії U_1 , U_2 і U_3 . Початкове значення $P_{1,поч}$ для першого кроку обчислень, а також масу окисненого металу в кінці процесу нагрівання $M(\tau_{кін})$, які визначають режим нагрівання металу, обчислювали методом послідовних наближень, що завершували по досягненні кінцевої температурою металу $T_{м,кін}$ заданої точності.

Модельні розрахунки виконували за наступних початкових даних: $m = 62,4$ т; $F_m = 64$ м²; $F_{кл} = 60$ м²; $K = 20 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К); $\alpha = 250 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К); $Q_{п.в} = 0$; $c_m = 600$ Дж/(кг·К); $c_{п.г} = 1610$ Дж/(м³·К); $U_1 = 0 \dots 2,0$ м³/с; міра збагачення повітря киснем $k_{O_2} = 30$ %; $U_{2min} = 0$ м³/с; $U_{2max} = 0,12$ м³/с; паливо – природно-доменна суміш калорійністю $Q_H^p = 6,7$ МДж/м³; $T_r = 773 \dots 1673$ К; $T_m(0) = 293$ К; $T_m(\tau_{кін}) = 1523$ К; ціна металу $S_m = 5600$ грн./т; $S_o = 25$ грн./т; $S_{пал} = 801$ грн./1000 м³; $S_{O_2} = 400$ грн./1000 м³; $\tau_{кін} = 4$ год.; $\Delta\tau = \tau_{кін}/100$.

Розрахункові дані для оптимальних режимів нагрівання металу з різними комбінаціями дій, що управляють, подано у табл. 1. Встановлено, що перехід від окиснювального (режим 1) на малоокиснювальне нагрівання (режим 2) супроводжується зниженням вигару металу. Одночасно, неповне спалювання природно-доменної суміші на завершальному етапі нагрівання металу призводить до збільшення витрати енергоносія.

Таблиця 1 – Результати розрахунків нагрівання металу за оптимальним управлінням

Режим нагрівання	Дії, що управляють			Вигар металу, %	Втрати від окалини, грн.	Вартість енергоносіїв, грн.			Загальні витрати, грн.
	U_1	U_2	U_3			паливо	кисень	Стисле повітря	
1	+	-	-	2,44	890,0	13890	0	0	14780
2	+	-	+	1,75	532,5	14410	0	90	14500
3	+	+	+	1,68	419,0	12980	330	80	13400

Використання кисню (режим № 3) дає змогу додатково понизити вигар металу, а також зменшити витрати енергоресурсів. Під час переходу від оптимального режиму нагрівання за управлінням тільки витратою палива на оптимальне малоокиснювальне нагрівання із трьома діями, що управляють, можна забезпечити поліпшення економічних показників роботи нагрівальних печей. Так, зафіксовано зниження вигару металу на 37 %, витрати енергоресурсів – на 3,4 %, а також загальних витрат – на 6,4 %.

Під час аналізу економічних показників малоокиснювального нагрівання за змінюванням

коефіцієнта рекуперації теплоти k_p та ціни на кисень S_{O_2} також виконано відповідні обчислення (табл. 2). Так, встановлено, що збільшення значення k_p від 0 до 0,5 забезпечує скорочення сумарних витрат на 46 %, витрат енергоресурсів – на 47 %, а також витрат від утворення окалини металу – на 44 %. За таких умов з'являється можливість зміцнення головного теплового навантаження на завершальну стадію нагрівання металу, зменшення часу його перебування у печі за високої температури, а також понизити його вигар.

Таблиця 2 – Результати розрахунків нагрівання металу за змінювання коефіцієнта рекуперації теплоти

Ціна кисню, грн./1000 м ³	Коефіцієнт рекуперації	Вартість енергоносіїв, грн.			Вигар металу, кг/м ²	Втрати металу від створення окалини, грн.	Загальні витрати, грн.
		Паливо	Кисень	Стисле повітря			
500	0	2110	353	16,0	1,87	321	5600
500	0,1	2016	115	22,0	1,68	288	4885
500	0,2	1802	0	22,5	1,53	262	4110
500	0,3	1598	0	26,0	1,22	210	3675
500	0,4	1431	0	24,0	1,12	191	3300
500	0,5	1299	0	22,0	1,95	179	3050

Висновки. Вирішено модельну задачу оптимального управління малоокиснювальним нагріванням металу в печах камерного типу. Як дії, що управляють, розглянуто витрату палива, питому витрату кисню та коефіцієнт витрати стислого повітря, що подають на допалювання

палива. Встановлено, що під час переходу на режим малоокисненого нагрівання з трьома рівними діями зафіксовано поліпшення техніко-економічних показників теплової роботи печей камерного типу.

Бібліографічний список

1. **Карп, И. Н.** Энергосбережение в Украине : проблемы и пути решения [Текст] / И. Н. Карп // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 4. – С. 3-13.
2. **Губинский, В. И.** Направления совершенствования печной техники и энергетических установок на металлургических предприятиях [Текст] / В. И. Губинский, Р. Г. Хейфец // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 93-97.
3. **Гусовский, В. Л.** Современное состояние и совершенствование конструкций методических печей [Текст] / В. Л. Гусовский, Т. В. Калинова, Л. А. Пинес, А. Б. Усачев // Сталь. – 2001. – № 1. – С. 46-50.
4. **Гузов, Л. А.** Анализ режимов нагрева с точки зрения окисления стали [Текст] / Л. А. Гузов, В. М. Ольшанский, Н. Ю. Тайц, М. М. Шкиндрер // Известия вузов. Черная металлургия. 1970. – № 12. – С. 145-146.
5. **Парсункин, Б. Н.** Оптимальный режим использования топлива при энергосберегающем нагреве [Текст] / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, А. В. Комарова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 12. – С. 48-53.
6. **Гусовский, В. Л.** Перспективы совершенствования работы нагревательных печей прокатного производства на отечественных металлургических заводах [Текст] / В. Л. Гусовский // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 11. – С. 57-59.

7. **Казанцев, Е. Н.** Влияние состава атмосферы на процесс окисления [Текст] / Е. Н. Казанцев // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ*. – Днепропетровск, 1999. – Т. 1. – С. 108-112.
8. **Ревун, М. П.** Модельная оптимизация нагрева по стоимости топлива, кислорода и окисленного металла [Текст] / М. П. Ревун, В. Н. Погорелов, А. И. Чепрасов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1990. – № 10. – С. 63-65.
9. **Ревун, М. П.** Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии [Текст] / М. П. Ревун, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. – 444 с.
10. **Ревун, М. П.** Моделирование нагрева металла при автоматизированном проектировании и управлении [Текст] / М. П. Ревун, А. К. Соколов. – Запорожье : ЗГИА, 2000. – 352 с.
11. **Зобнин, Б. Ф.** Теплотехнические расчеты металлургических печей [Текст] / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев и др. Под ред. А. С. Телегина. – М. : Металлургия, 1982. – 358 с.
12. **Маковский, В. А.** Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами [Текст] / В. А. Маковский. – М. : Металлургия, 1971. – 384 с.

Каюков Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Иванов Виктор Ильич, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного управления производственными процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Чепрасов Александр Иванович, кандидат технических наук профессор кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

Радченко Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: y.n.radchenko@gmail.com

К УПРАВЛЕНИЮ МАЛООКИСЛИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА

Предложена математическая модель оптимального управления процессом малоокислительного нагрева металла в условиях нагревательных печей камерного типа. В качестве критериев управляющих воздействий рассмотрены расход топлива, удельный расход кислорода и коэффициент расхода воздуха, подаваемого на горение топлива.

Ключевые слова: печь камерного типа, малоокислительный нагрев металла, математическая модель, критерии управляющих воздействий

Kayukov Yuriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Ivanov Victor, Senior Staff Scientist of Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Cheprasov Alexander, Candidate of Technical Sciences, professor of Department of Heat and Power Engineering Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

Radchenko Yuriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology, Heating Engineering and Protection of Labour, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnieper, Ukraine). E-mail: y.v.radchenko@gmail.com

TO CONTROL OF LOW-OXIDATIVE HEATING METAL IN CHAMBER FURNACES

A mathematical model for optimal control of the low-oxidative heating metal process in heating furnaces of chamber type is proposed. As a criteria of control impacts specific oxygen consumptions and consumption coefficient of air, given for burning of fuel, are considered.

Keywords: furnace of chamber type, low-oxidative heating metal, mathematical model, criteria of control impacts

Стаття надійшла до редакції 07.10.2018 р.
Рецензент, проф. А.С. Мних