

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ ДУТТЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Создана модель управления процессом дутья конвертерной плавки; доказана возможность существенного повышения качества управления за счет введения обратной связи по непрямым методам измерения параметров процесса; разработаны и испытаны по производственным данным алгоритмы контроля и управления параметрами процесса дутья; разработана система управления процессом дутья в конвертере в составе АСУТП конвертерной плавки, реализующая статическое, динамическое и замкнутое управление.

Created control model the blowing process of BOF; a possibility of significantly improving the quality of management by introducing a feedback connection by indirect methods for measuring parameters of process; algorithms of control and management of parameters of process of blowing worked out and tested from industrial data; worked out control system by the process of blowing is in a converter in composition of APCSTP which will realize a static, dynamic and closed management.

Вступ

У сучасних умовах конкуренції одна з основних задач, що стоїть перед сталеплавильниками – це виплавка якісної сталі з мінімальними витратами. Підвищення якості керування киснево-конверторним процесом є одним з шляхів вирішення даної задачі.

У літературі описані різні методи побудови математичної моделі і систем керування процесом. З розгляду математичних моделей виходить, що при достатньо великому їх різноманітті відсутня загальна методологія їх побудови і оцінювання [1, 2, 3, 4]. Існують статичні і динамічні моделі процесу, але динамічні не можуть забезпечити задану точність, тому що в основному вони є статистичними і мають ряд недоліків.

Найважливіші технологічні складові процесу продування конвертерної плавки – зневуглецювання, шлакоутворення і температура – залежать від режиму дуття, що визначає глибину реакційної зони. Параметрами регулювання режиму дуття є інтенсивність подання кисню і відстань кінцевика фурми до рівня ванни [5]. Неоптимальний вибір цих параметрів порушує синхронну зміну швидкості зневуглецювання і температури ванни, призводить до утворення густих гетерогенних шлаків з високими значеннями вмісту кремнезему і в'язкості, що гальмує процес знесіркування, або, навпаки, занадто рідких шлаків, що спричиняє викиди металу. Все це підтверджує актуальність рішення проблеми створення математичної моделі керування режимом дуття.

Постановка задачі

Метою даної статті є створення моделі і засобів керування режимом дуття, що охоплює всі періоди плавки на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної і надійної інформації про хід процесу і реалізації згаданого в АСКТП конвертерної плавки.

Принципи побудови моделі

Аналіз детермінованих, стохастичних і комбінованих моделей показав, що всі вони мають ті чи інші вади і не можуть безпосередньо використовуватись для керування конвертерною плавкою. Для побудови моделі пропонується використати комплексний метод, що заснований на використанні плавко позитивного досвіду (“зразкових”). При цьому використовується методика, що викладена в [6, 7].

Статична модель керування

Статичне керування конвертерною плавкою – це розрахунок керуючих діянь до початку процесу продувки. Неправильно розраховані діяння призводять до необхідності проведення коректуючих діянь, а саме додувки чи охолодження.

Критерій статичної моделі:

$$I(V, \bar{H}, v_{\Pi}, H_{\Pi}) = \alpha_7 M \left(C_M - C^* \right)^2 + \alpha_8 M \left(t_M - t^* \right)^2 + \alpha_9 M \left(S_M - S^* \right)^2, \quad (1)$$

при обмеженнях окиснення потрібної кількості вуглецю, силіцію і мангану визначається $V \geq V_{\Phi}$, підтримання висоти положення фурми над рівнем спокійного металу у межах, що передбачені технологічною інструкцією, $H_{\min} \leq H_{\Pi} \leq H_{\max}$, так як, якщо фурму занадто опустити можливе розмивання днища конвертера, якщо підняти вище метало-шлако-газової емульсії – нетехнологічна продувка; проектну продуктивність конвертера

$V_{\min} \leq V_{II} \leq V_{\max}$, мінімальне значення не може бути меншим планового, максимальне – визначається прохідною здатністю газовідводячого тракту, $\bar{H}_{\min} \leq \bar{H} \leq \bar{H}_{\max}$ – забезпечення нормальних умов шлакоутворення, де V , \bar{H} , v_{II} , H_{II} – керуючі діяння відповідно загальна витрата дуття на плавку, m^3 ; середньо інтегральна відстань кінцевика фурми від рівня спокійного металу, калібр; поточні значення інтенсивності продування, $m^3/(t \cdot \text{хв.})$ і положення фурми над рівнем спокійного металу, калібр. (останні два визначають програму зміни параметрів режиму дуття під час продувки); V_{ϕ} – фактичний об'єм кисню на плавку, m^3 ; α_7 , α_8 , α_9 – коефіцієнти, що визначаються масштабами змінних, які входять у критерій, а також залежать від співвідношення частот коректувань плавки через непопадання по вуглецю, температурі і сірці, відповідно; M – знак математичного очікування; C^* , t^* , S^* – “точки прицілу” по вуглецю, температурі й сірці у металі, що визначається методом експертних оцінок в залежності від технологічної ситуації на початку продувки (наявність заказу, готовність сталерозливного ковшу, розливної площадки, установки позапічної обробки та інш.); “min”, “max” – індекси мінімального і максимального значення параметра.

У відповідності із принципами створення моделі плавки за вихідними параметрами поділяються на класи. В кожному класі знаходиться плавка позитивного досвіду, що вноситься в базу за результатами раніш проведених плавок. Керуючі діяння – витрати дуття на плавку, середньоінтегральне значення положення фурми над рівнем спокійного металу, миттєве значення інтенсивності продувки і миттєве значення положення фурми, що визначаються програмою, установлюється такими, як на плавках позитивного досвіду.

При поділі плавок на класи треба враховувати два суперечливі моменти: при широких межах класу за вихідними параметрами на траєкторію керування суттєво впливають нелінійні залежності між вхідними параметрами і керуючими діяннями, при вузьких межах класу значно зростає кількість класів.

Компромід був знайдений шляхом збільшення меж параметрів по класам з одночасним введенням в модель поправок, що враховують відхилення значень вихідних параметрів від їх значень на плавках позитивного досвіду.

Плавка позитивного досвіду може знаходитися на значній відстані по часу від поточної. Дрейф об'єкту (зношення футерівки, фурми, зміна складу сипких матеріалів та інше), що невинно проходить може призвести до суттєвих відхилень значень керуючих діянь в поточній плавці в порівнянні зі зразковою. Одночасно на поточну плавку можуть впливати різкі неконтрольовані зміни в технології. Тому модель повинна включати поправки, що враховують ці впливи.

Враховуючи вищенаведене статичний розрахунок режиму дуття має вигляд (коефіцієнти наведені для умов ВАТ МК “Азовсталь”) [8]

$$V = V^0 + 30(m_B - m_B^0) + 2,9 \left[m_{Cq} - m_{Cq}^0 \right] \left(m_{Cq} - m_{Cq}^0 \right) + 190(Si_{Cq} - Si_{Cq}^0) - K_1 \left[f_1(C_{M.3}) - f_1(C_M^0) \right] - K_2 \left[f_2(m_{BK}) - f_2(m_{BK}^0) \right] + 40(m_B - m_B^0) + 130(m_{III} - m_{III}^0) + 10(H_3 - H^0) + \Delta V, \quad (2)$$

де K_1 , K_2 – коефіцієнти регресії, що уточнюються періодичною корекцією; ΔV – поправка, що враховує дрейф об'єкта, m^3 ; H_3 – задане середньоінтегральне за продувку значення відстані кінцевика фурми до рівня спокійного металу, калібр.

Для забезпечення однакових умов протікання продувки також розраховується заданий дуттьовий режим, що визначається параметром v_3/H_3 , $m^3/(\text{хв.} \cdot \text{калібр})$:

$$v_3 / H_3 = v^0 / H^0 + 0,02(m_B - m_B^0) - 0,00671(t_{Cq} - t_{Cq}^0) - 1,67(Si_{Cq} - Si_{Cq}^0) + 0,95(Mn_{Cq} - Mn_{Cq}^0) - 22,3(S_{Cq} - S_{Cq}^0) + 0,13(1/C_{M.3} - 1/C_M^0) + 0,02(t_{M.3} - t_M^0) + 1,42(m_{III} - m_{III}^0), \quad (3)$$

де v_3 – задані витрати кисню, $m^3/\text{хв.}$

Нами було визначено вплив початкових умов на потрапляння плавки у задані межі [9]. Для цього розраховані імовірності появи наступних подій NC – додувки на вуглець, NQ – нагріву, NT – охолодження, NS – додувка для видалення сірки.

Рівняння множинної регресії має вигляд

$$NC = 13,3 + 22C_{Cq} - 11,2Si_{Cq} + 22,9Mn_{Cq} - 2070 P_{Cq} + 130C_3 + 16,8(S_{Cq} - S_3) / S_3 - 2,98V_{II} + 0,000114Q_{II}, \quad (4)$$

Коефіцієнт кореляції $R = 0,673$; середньоквадратичне відхилення $\sigma = 14,2\%$; достовірність коефіцієнта кореляції $P > 0,950$.

Відповідно

$$NQ = 134 + 41,5C_{Cq} - 7,45Si_{Cq} - 16,2Mn_{Cq} + 46,6P_{Cq} - 84,6C_{Cq} - 38,3(S_{Cq} - S_3) / S_3 - 2,05V_{II} - 0,000121Q_{II} \quad (5)$$

$R = 0,667$; $\sigma = 14,4\%$; $P > 0,950$.

$$NT = -1,52 - 10,9C_{\text{ч}} - 22,8Si_{\text{ч}} + 26,4Mn_{\text{ч}} - 568P_{\text{ч}} + 0,51C_{\text{ч}} + 27,9(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3 + 1,61V_{\text{ч}} + 0,000152Q_{\text{ч}} \quad (6)$$

$$R = 0,787; \sigma = 12,9\%; P > 0,950.$$

$$NS = -6,89 - 16,7C_{\text{ч}} - 36,1Si_{\text{ч}} - 5,49Mn_{\text{ч}} + 98,4P_{\text{ч}} + 110C_3 + 11,6(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3 + 4,42V_{\text{П}} - 0,000111Q_{\text{П}} \quad (7)$$

$$R = 0,685; \sigma = 10,7\%; P > 0,950.$$

Тут $C_{\text{ч}}$, $Si_{\text{ч}}$, $Mn_{\text{ч}}$, $P_{\text{ч}}$, $S_{\text{ч}}$ – відповідно частка вуглецю, силіцію, мангану, фосфору, сірки у чавуні, %; $V_{\text{П}}$ і $Q_{\text{П}}$ відповідно значення кисневого, $\text{м}^3/\text{т}$ металошихти, і теплового, $\text{кДж}/\text{т}$, потенціалу ванни; „з” – індекс заданого кінцевого значення вмісту елемента.

Чим менша величина NC , NQ , NT , NS , тим менша імовірність того, що потрібно буде коректувати плавку.

Динамічна модель керування

Такий саме принцип покладений і при побудові динамічної моделі.

З умов нормального шлакоутворення і виключення переокиснення ванни при переході до періоду інтенсивного зневуглецювання визначається максимально можлива інтенсивність продувки у перший період по інформації про фізичну і хімічну теплоту чавуну, а також кількість теплоти, що відбирається на плавлення брухту.

$$v_{\text{поч}} = v_{\text{поч}}^0 + 115 \lg t_{\text{ч}} / t_{\text{ч}}^0 + 216 \lg Si_{\text{ч}} / Si_{\text{ч}}^0 + \gamma_1 - \gamma_1^0, \quad (8)$$

де $v_{\text{поч}}$ – початкове значення витрат кисню, $\text{м}^3/\text{хв}$; $t_{\text{ч}}$ – температура чавуна, $^{\circ}\text{C}$; γ_1 – коефіцієнт, що визначається насипною масою брухту і дорівнює нулю для важкого брухту, – 25 для середньої насипної маси і – 50 для легкого брухту, $\text{м}^3/\text{хв}$.

Подальше керування витратами кисню здійснюється по швидкості зневуглецювання v_{C} , $\%/\text{хв}$. Витрати дуття у період інтенсивного зневуглецювання змінюють з умови пропускної здатності газовідводячого тракту, яку контролюють по температурному лінійному розширенню екранних труб газоходу ОКГ

$$v = v^0 + 982 (v_{\text{C}}^0 + v_{\text{C}}) + 39,4 (\Delta l^0 - \Delta l), \quad (9)$$

де Δl – температурне лінійне розширення екранних труб підйомного газоходу ОКГ, мм.

Алгоритм керування положення фурми складений для найбільш загального випадку – проведення плавки, коли частину кінцевого шлаку попередньої плавки, залишають у конвертері має вигляд.

У першому періоді продувки відстань торця фурми над рівнем спокійної ванни визначається в залежності від маси залишеного шлаку, насипної маси брухту і витрат кисню

$$H_{\text{П}} = H_{\text{П}}^0 - 0,85 \left(m_{\text{ШЛ}} - m_{\text{ШЛ}}^0 \right) + \left(\gamma_2 - \lambda_2^0 \right) + 0,89 \left(\sqrt{v_{\text{П}}} - \sqrt{v_{\text{П}}^0} \right) + \Delta H' \quad (10)$$

де $H_{\text{П}}$ – початкове положення фурми відносно рівня спокійної ванни, калібр; $m_{\text{ШЛ}}$ маса залишеного у конвертері шлаку від попередньої плавки, т; γ_2 – коефіцієнт, що визначається насипною масою брухту і рівний 3 у випадку легкого брухту, 0 – при середній насипній здатності брухту і – 0,75 для важкого брухту, калібр; $\Delta H'$ – поправка до положення фурми, калібр.

Тривалість першого періоду визначається за об'ємом продутого кисню, який порівнюється з заданим значенням.

Хід шлакоутворення контролюється за сигналами про акустичну характеристику продувки (рівень метало-шлако-газової емульсії) і налипанню шлаку на фурму (його консистенції). Наведення шлаку характеризується поєднанням сигналів

$$(A_j - A_{j-1}) < 0 \quad (11)$$

і

$$\Delta \tau_H - \Delta \tau < 30, \quad (12)$$

де A – сигнал про акустичну характеристику продувки, %; $\Delta \tau_H$, $\Delta \tau$ – початкове і поточне значення проміжків часу між різкими змінами температурного режиму у робочому просторі конвертера і відповідними змінами температурного перепаду води, що охолоджує фурму, с.

При прискореному шлакоутворенні наведення шлаку закінчується при значеннях об'єму кисню

$$V < \left(0,15V^* - 135m_{\text{П.ШЛ}} \right), \quad (13)$$

де V, V^* – відповідно поточний і розрахований на продувку об'єм кисню, m^3 ; $m_{п.шл}$ питома маса залишеного шлаку після попередньої плавки т/т сталі.

Поправка $\Delta H'$ на наступну плавку при цьому дорівнює мінус 0,75 калібрів.
Нормальний процес шлакоутворення у першому періоді протікає при

$$(0,15V^* - 135m_{п.шл}) \leq V < (0,25V^* - 135m_{п.шл}) \quad (14)$$

Поправка $\Delta H'$ на наступну плавку дорівнює 0.
Якщо при продувці об'єму кисню

$$V = 0,25V^* - 135m_{п.шл} \quad (15)$$

шлак не наведений, приймають штучні заходи по його наведенню шляхом введення плавикового шпату, питома маса якого визначається по формулі

$$m_{п.ш} = 0,0025 - 0,072m_{п.шл}, \quad (16)$$

де $m_{п.ш}$ – питома маса шпату, т/т сталі.

У цьому випадку поправка $\Delta H'$ на наступну плавку дорівнює 0,75 калібрів.

У другому періоді відстань торця фурми відносно рівня спокійної ванни встановлюється на значенні у плавці позитивного досвіду $H = H^0$. У випадку відхилення режиму шлакоутворення при співставленні з плавкою позитивного досвіду коректується положення фурми на величину

$$\Delta H = -3,8 + 0,36(A - A^0) - 0,022[(\Delta\tau_{II} - \Delta\tau) - (\Delta\tau_{II} - \Delta\tau)^0], \quad (17)$$

де ΔH – корекція положення фурми, калібр.

При відхиленнях режиму шлакоутворення від заданого у межах

$$(-0,75 + 0,25m_{п.шл}) < \Delta H < (0,75 + 0,25m_{п.шл}) \quad (18)$$

підтримується значення положення фурми таке саме як і у плавці позитивного досвіду.

При відхиленнях режиму шлакоутворення від заданого у межах

$$(-1,5 + 0,25m_{п.шл}) < \Delta H < (-0,75 + 0,25m_{п.шл}) \quad (19)$$

чи

$$(0,75 + 0,25m_{п.шл}) < \Delta H < 2(0,75 + 0,25m_{п.шл}) \quad (20)$$

встановлюється значення положення фурми на значенні

$$H = H^0 + \Delta H. \quad (21)$$

Якщо $\Delta H < (-1,5)$ (занадто рідкий шлак), то разом зі зниженням положення фурми, вводять додатково вапно питомої маси

$$m_{п.в} = 0,0025 + 0,165m_{п.шл} \quad (22)$$

і підвищуються витрати дуття

$$v = 1,15v^0, \quad (23)$$

де $m_{п.в}$ – питома маса вапна, т/т сталі.

Якщо $\Delta H > 2(0,75 + 0,25m_{п.шл})$ (занадто густий шлак), то разом з підвищенням положення фурми вводять додатково плавиковий шпат питомої маси

$$m_{п.ш} = 0,0025 + 0,072m_{п.шл}. \quad (24)$$

Кінцеве значення положення фурми відносно рівня спокійної ванни встановлюється при

$$V \geq (0,85V^* - 135m_{п.шл}) \quad (25)$$

на рівні плавки позитивного досвіду.

Розрахункову масу шлаку, що треба залишити в конвертері, визначають по формулі

$$m_{ШЛ} = 0,0523 \left(\int_{\tau_{111}}^{\tau_{ПП}} A d\tau - \int_{\tau_{111}}^{\tau_{ПП}} A^0 d\tau \right) + m_{ШЛ}^0 \quad (26)$$

де $m_{ШЛ}$ – маса шлаку, що рекомендується залишити у конвертері на наступну плавку, т/т сталі; τ_{111} – початок останнього (третього) періоду продувки поточної плавки, хв.; $\tau_{ПП}$ – тривалість продувки, хв.

Модель доведення плавки

Плавку коректують після повного розплавлення брухту, тобто на заключному етапі продувки, так як з цього моменту інформація про температуру розплаву і масову частку у ньому вуглецю характеризує всю ванну. Для доведення в багатьох системах автоматизації використовують проміжний контроль стану ванни за допомогою вимірювального занурювального зонду.

Модель передбачає визначення діянь за „зразковими” плавкам [10, 11, 12]. Розрахунок охолоджуючого матеріалу (вапняку) і сумарних витрат кисню на доведення плавки проводиться при визначенні вмісту вуглецю і температури у металі на останній фазі продувки за допомогою зонду $C_{зд}$

$$m_{ВП}^P = m_{ВП}^O - 0045(\Delta t^O - \Delta t^P) - 4,5(\Delta C^O - \Delta C^P); \quad (27)$$

$$\Delta V^P = \Delta V^O - \left[\varphi(C_M^O) - \varphi(C_M) \right] - 100(m_{ВП}^P - m_{ВП}^O), \quad (28)$$

де $m_{ВП}^O$ – маса вапняку на охолодження, т; ΔV^O – сумарний об'єм кисню, м³; Δt^O , Δt^P – потрібна зміна температури, °С; ΔC^O , ΔC^P – потрібна зміна вмісту вуглецю у металі, %; C_M^O , C_M – відповідно вміст вуглецю у металі на „зразковому” доведенні і фактичний, %; „^о”, „^р” – відповідно індекс зразкової і поточної плавки.

$$\text{Тут,} \quad \varphi(C) = \begin{cases} 5000 \cdot C & \text{при } C \leq 0,1\%; \\ 340 - 1600 \cdot C & \text{при } C > 0,1\% \end{cases} \quad (29)$$

Положення фурми і інтенсивність подання кисню на доведення встановлюються рівними їх значенню на „зразковому” доведенні $H^P = H^O$, $v^P = v^O$. При $m_{ВП}^P \leq 0$

$$\Delta H^P = -0,004 \cdot m_{ВП}^P; \quad (30)$$

$$\Delta \tau^{P^0} = -0,5 \cdot m_{ВП}^P; \quad (31)$$

$$\Delta V_H^P = 318 \cdot \Delta \tau^P. \quad (32)$$

Регулювання положення фурми і витрати дуття проводиться за стандартним ПІД алгоритмом контролерами QUANTUM і ROC-809, витрата кисню на продувку розраховується за величиною тиску, перепаду тиску кисню на продувку і його температури за стандартною методикою контролером [1].

Висновки

Удосконалений підхід до проблеми побудови математичної моделі процесу дуття, що заснований на сумісному поєднанні детермінованих, евристичних і імовірних методів з наступною ідентифікацією моделі у процесі експлуатації за плавками позитивного досвіду. При використанні цього підходу, було сформульовані критерії статичної, динамічної і замкненої моделей, розроблена і реалізована статична модель керування процесу дуття, динамічна модель керування, модель доведення плавки, яка передбачає визначення діянь за „зразковими” плавками і результатами проміжного вимірювання за допомогою зонду і на повалках конвертера.

Розроблені моделі і алгоритми реалізовані в АСК режимом дуття в складі АСКТП конвертерної плавки і пройшли промислове випробування за даними конвертерного цеху ВАТ «Металургійний комбінат „Азовсталь”». Моделі передані ТОВ „ТРЕІ-Україна” для впровадження на конвертері № 3 ВАТ «Арселорміттал, Кривий Ріг».

Експлуатація АСКТП дозволила суттєво підвищити якість керування і ТЕП процесу: скоротити тривалість продувки на 1,5 хв., зменшити вигар заліза на 0,5 %, знизити брак до 1 %; підвищити стійкість футерівки конвертерів, зменшивши витрати вогнетривів на 3 %; збільшити кількість плавок, що контролюються на 10 %; знизити витрати феросплавів на 25 кг на плавку; підвищити частку плавок, що випускаються без коректування на 18%. Очікуваний економічний ефект складає 956 тис. грн. на 1 млн. тонн сталі.

Список літератури

1. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / [В. С. Богусhevский, Л.Ф.Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин]. – К.: НПК “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
2. Бигеев, А. М. Использование математической детерминированной термодинамической модели в управлении кислородно-конвертерным процессом / А. М. Бигеев, В. В. Байтман // Изв. Челябинского науч. центра, вып. 4 (30), 2005. – С. 73 – 76.
3. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов / Бигеев А. М. – М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
4. Рожков, И. М. Математические модели конвертерного процесса // Рожков И. М., Травин О. В., Туркенич Д. И. – М.: Металлургия, 1978. – 183 с.
5. Богусhevський В.С., Сухенко В.Ю. Керування режимом дуття конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 1. – С. 58 – 64.
6. Богусhevський, В. С. Принципи створення моделі конвертерного процесу / В.С.Богусhevський, В.Ю.Сухенко // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “Матеріали для роботи в екстремальних умовах” м. Київ, 30 – 31 жовтня. – 2008. – С. 140 – 143.
7. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С.Богусhevский, Г.Г.Грабовский, В.М.Михайлов [и др.]. //Сталь. – 2006. – № 1. – С. 18 – 21.
8. Богусhevский В.С. Реализация модели управления конвертерной плавкой в системе принятия решений / В. С. Богусhevский, В. Ю. Сухенко, Е. А. Сергеева, С. В. Жук // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи. – 2010. – № 1 (25) – С. 101 – 106.
9. Богусhevский В.С. Критерий управления конвертерной плавкой / В.С.Богусhevский, В.Ю.Сухенко // Новости науки Приднепровья. – 2008. – № 3 – 4. – С. 104 – 106.
10. Богусhevский В.С. Система прийняття рішень при керуванні киснево-конвертерною плавкою / В.С.Богусhevский, В.Ю. Сухенко, К.О. Сергеева // Нові технології. – 2009. – № 1. – С. 98 – 101.
11. Богусhevский В.С. Управление доводкой конвертерной плавки / В.С.Богусhevский, В.Ю. Сухенко, Е.А.Сергеева // Металл и литье Украины. – 2010. – №3. – С. 14 – 18.
12. Богусhevський В.С. Аналіз можливостей використання відомих принципів розробки моделі для управління конвертерною плавкою / В. С. Богусhevський, В. Ю.Сухенко, К. О.Сергеева, С. В. Жук // Матер. XV Міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика–2010), м. Харків, 27–29 вересня 2010 р. – Ч.1 – Харків, 2010. – С.188 – 190.