

## МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНИМ ПРОЦЕСОМ У СИСТЕМІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

В.С. БОГУШЕВСЬКИЙ, С.В. ЖУК, К.О. СЕРГЕСЬВА, М.В. ГОРБАЧОВА

Наведено принцип розробки моделі стосовно статичного та динамічного керування киснево-конвертерним процесом. Розглянуто моделі статичного (розрахунок металеві частини шихти, маси шлакоутворюючих, охолоджуючих і нагріваючих матеріалів, модель розрахунку сипких на плавку з використанням кінцевого шлаку) і динамічного (контроль маси маталу, швидкості знеуглецювання, шлакоутворення, модель визначення доцільності й моменту скошування шлаку, динамічна модель додувки плавки) керування. Наведено відеокадри (прикладі) реалізації моделі керування: відеокадр «розрахунок металеві частини шихти», відеокадр «рекомендації з ведення плавки», відеокадр «додувка». Проаналізовано результати промислових іспитів моделі, які проводилися за даними керування 350-тонними конвертерами ВАТ Металургійний комбінат «Азовсталь», що показали збільшення ефективності роботи конверторів за основними показниками: збільшення виходу придатного литва, стійкості футерівки, збільшення кількості контрольованих плавок.

### ВСТУП

Киснево-конвертерна плавка відрізняється складністю фізико-хімічних процесів, проходить із великою швидкістю та за високої температури, характеризується багаторежимністю функціонування та великою розмірністю задач, присутністю нестационарних і взаємнокорельованих шумів і перешкод вимірюванню, а також має суттєвий дрейф робочих параметрів. Останнє визначається ступенем підготовки вихідних матеріалів, стабілізацією параметрів процесу. Чим нижчий ступінь підготовки шихтових матеріалів, тим важче керувати процесом. Автоматизація конвертерного процесу дозволяє суттєво підвищити його ефективність і якість сталі, що виплавляється.

До цього часу розроблено низку математичних моделей конвертерної плавки як вітчизняними, так і закордонними фірмами. Аналіз моделей передових закордонних фірм Jones & Laughlin, Danieli, Voest-Alpine показує, що вони непридатні до умов вітчизняного виробництва, а це пов'язано з великим сортаментом марок сталі, що виплавляються на вітчизняних підприємствах, слабкою підготовкою й усередненням сировинних матеріалів. Вітчизняні моделі [1–5], важко використовувати, тому що вони створені для вузьких діапазонів зміни температури та хімічного складу шлаку. Моделі нелінійні відносно масових часток домішок. Вони дозволяють отримати деяку «середню» плавку з метою дослідження окремих особливостей процесу. Задача ж моделювання конкретних плавок із метою керування процесом на порядок складніша.

Все це підтверджує актуальність рішення проблеми створення математичної моделі керування конвертерним процесом.

Наведені в роботі дослідження проводились у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за темами «Принципи створення математичної моделі системи управління кисневим конвертером» і «Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером» державні реєстраційні номери 0109U001838 та 0110U002880 на ПАТ «Металургійний комбінат „Азовсталь”» і ПАТ «АрселорМіттал, Кривий Ріг».

**Мета роботи** — створити моделі керування конвертерним процесом, які забезпечують високу адаптацію до зміни вихідних параметрів та можуть працювати в умовах широкої номенклатури марок сталі (гнучкої до зміни технології).

## **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Основний принцип, який покладено в розробку моделі, такий: для плавки із однаковими початковими (маса, хімічний склад і температура чавуну, маса, щільність і хімічний склад металевих брухту тощо) і кінцевими (задана марка сталі за хімічним складом і температурою, її маса тощо) умовами керування діями по переводу плавки із початкового стану в кінцевий (маса шихтових матеріалів, зокрема металеві частини шихти, режим дуття тощо) мають бути однаковими [6].

Модель керування має забезпечувати статичне (визначення режиму проведення плавки до її початку, виходячи із значень вихідних параметрів), динамічне (контроль прямими і непрямими методами основних параметрів плавки — швидкості знеуглецювання, температури ванни, основності шлаку; коректування керування діями, що визначені статичною моделлю, відповідно до реального проходження процесу), замкнене керування продувкою конвертерної плавки й введення розкиснювачів у виплавлений метал (поступовий перехід по мірі зростання якості керування від системи прийняття рішень до системи прямого цифрового керування).

Реалізація основного принципу створення моделі щодо статичного керування плавкою виглядає таким чином. Маючи вибірку траєкторій керування успішно проведених плавки, можна говорити про виділення в реальній траєкторії двох складових: програмної частини та додаткового керування, що зв'язане як із неточним визначенням вихідного стану, так і з дією перешкод. Стратегія керування не може бути зведена до чисто детермінованої [7], а складається з детермінованої (вибір програми) і стохастичної (визначення додаткових керування діями) частин. Для визначення першої частини проводиться класифікація плавки за початковими та кінцевими умовами плавки. Кожна проведена плавка відноситься до того чи іншого класу (плавка «позитивного» досвіду). При цьому виникає протиріччя: за малого діапазону розбиття параметрів на класи кількість класів непомірно зростає, за великого — суттєво починає впливати нелінійність залежностей у середині діапазону. Протиріччя вирішено шляхом визначення додаткових керування діями в межах діапазону [8].

Маючи на увазі, що об'єкт (конвертер) дрейфує в процесі експлуатації (зношується футерівка, що змінює теплові втрати, заростає горловина, що впливає на режим видалення газів із порожнини конвертера, зношується фурма, що змінює режим дуття тощо), а виплавляється великий сортамент ста-

лей, плавки «позитивного» досвіду можуть відрізнятися за станом об'єкта. Тому модель доповнюється корегуючим фактором на стан об'єкта, який визначається за неточністю керування на попередніх плавках [9].

Цей же підхід застосовується і для інших частин моделі. Звичайно, для кожної з них масив плавок «позитивного» досвіду будується окремо. Розбиття плавок на класи по окремим задачам наведено в [10].

### Статична модель

Статична модель включає розрахунок шихти (масу чавуну, брухту, шлакоутворюючих та охолоджуючих матеріалів, загальну витрату дуття на плавку) і параметрів режиму дуття (інтенсивності продування ванни та відстані кінцевика фурми до рівня спокійного металу).

Розрахунок маси брухту і чавуну не є задачею реального часу, ініціюється вводом заданої марки сталі. Результати розрахунку виводяться на екран (рис. 1). На початку зміни майстер виробництва проводить розрахунок металеві частини шихти згідно з планом виробництва за марками сталі на поточну зміну.

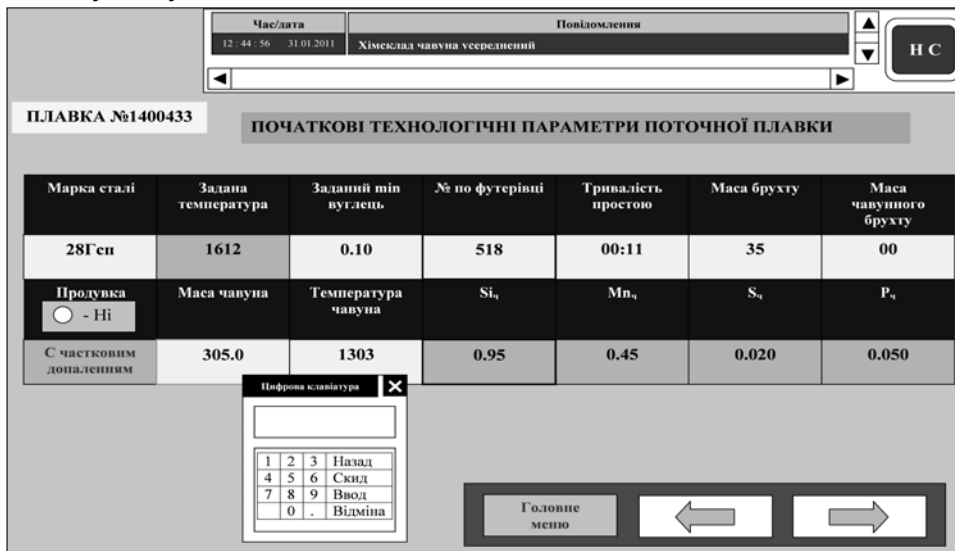


Рис. 1. Приклад відеокадру «Розрахунок металеві частини шихти»

Розрахунок металеві частини шихти (співвідношення чавун-брухт при фіксованій масі садки, що дорівнює для конвертерів ПАТ «АрселорМіттал, Кривий Ріг» 160 т) виконується за інформацією про вміст силіцію в чавуні та його температурі, а також заданій температурі сталі.

Розрахункова маса брухту визначається за формулою:

$$m_6^p = a_1(Si_{ч} - Si_{ч}^0) - a_2(t_c^3 - t_c^0) + (t_{ч} - t_{ч}^0) + a_4 + \Delta m_6^p,$$

де  $m_6^p$  — розрахункова маса брухту, т;  $a_1, \dots, a_4$  — умовно-постійні коефіцієнти;  $Si_{ч}$  — вміст силіцію в чавуні, %;  $t_c, t_{ч}$  — відповідно температура металу на повалці й чавуну,  $^{\circ}C$ ;  $\Delta m_6^p$  — поправка до розрахунку за досвідом попередніх плавок, т. Тут і далі «р» та «з» — індекси відповідно розрахункового та заданого значення параметрів.  $\Delta m_6^p$  визначається за формулою:

$$\Delta m_{\phi}^p = \frac{\sum_{n=2}^n (T_{\phi}^{\phi} - T_{\phi}^p) + 2 \sum_{n=2}^n (T_{\text{вп}}^{\phi} - T_{\text{вп}}^3) + 0,1 \sum_{n=2}^n (t_c^{\phi} - t_c^3) - 5,1 \sum_{n=2}^n (T_{\text{вуг}}^{\phi} - T_{\text{вуг}}^3)}{3},$$

де  $m_{\text{вп}}$ ,  $m_{\text{вуг}}$  — відповідно маса вапняку й вугілля марки АС, що введена в конвертер, т;  $n$  — порядковий номер плавки; « $\phi$ » — індекс фактичного значення параметра.

Розрахункова маса брухту зменшується на 2 т за нової футерівки конвертера  $N_{\phi} \leq 15$  плавок, а також за великого простою конвертера  $\tau_{\text{п}} > 240$  хв. В обох випадках спостерігаються великі втрати тепла на акумуляцію футерівки конвертера у процесі продувки.

Під час зміни маси садки перераховують масу брухту за формулою:

$$m_{\phi}^{\text{пр}} = \frac{m_{\phi}^p \cdot m_{\text{сд}}}{m_{\text{сд}}^0},$$

де  $m_{\text{сд}}$  — маса садки конвертера, т.

Якщо в металевій частині шихти присутній твердий чавун  $m(t_{\text{чб}}, \tau)$ , що є носієм додаткової теплоти, тоді кількість брухту визначається за формулою:  $m_{\phi}^{\text{пр}} = m_{\phi}^p + 0,05m_{\text{чб}}$ .

Під час використання для охолодження плавки металізованих окатків ( $m_{\text{ок}}, \tau$ ) маса брухту визначається за формулою:  $m_{\phi}^{\text{пр}} = m_{\phi}^p - 2,5m_{\text{ок}}$ .

Розрахунок проводиться один раз за зміну і коректується, якщо відхилення кінцевої температури металу перевищує 20 °С.

Маса чавуну визначається за формулою:  $m_{\text{ч}}^p = m_{\text{сд}} - m_{\phi}$ , де  $m_{\phi} = m_{\phi}^{\text{пр}}$ ,  $m_{\phi} = m_{\phi}^p$ , т.

Розрахунок шлакоутворюючих, охолоджуючих та теплоносіїв на плавку ініціюється введенням заданої марки сталі у режимі реального часу, результати виводяться на екран (рис. 2).

Балансово-статистичне рівняння розрахунку «базових» (вапно, вапняк, плавиковий шпат) добавок сипких на плавку, що складені на основі прирощень параметрів із використанням бази даних «плавок позитивного досвіду» («зразкових»), мають вигляд:

$$\begin{aligned} m_{\text{вп}}^p &= m_{\text{вп}}^0 - a_{10}(m_{\phi} - m_{\phi}^0) - a_{11}(m_{\phi} + m_{\text{ч}})(t_{\text{ч}} - t_{\text{ч}}^0) + a_{12}(m_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}^0) + a_{13}(t_{\text{ч}} - t_{\text{ч}}^0) + \\ &+ a_{14}(Si_{\text{ч}} - Si_{\text{ч}}^0) + a_{15}(Mn_{\text{ч}} - Mn_{\text{ч}}^0) - a_{16}[f_1(C_3^{\text{min}}) - f_1(C_{\text{ч}}^0)] + a_{17}(m_{\text{в}}^p - m_{\text{в}}^0) + \\ &a_{18}(m_{\text{ш}}^p - m_{\text{ш}}^0) - [f(\tau_n) - f(\tau_n^0)] - [f(N_{\phi}) - f(N_{\phi}^0)] + a_{19}(H^3 - H^0) + \Delta m_{\text{вп}}; \\ m_{\text{в}}^p &= m_{\text{в}}^0 - a_{20}(m_{\phi} - m_{\phi}^0) + a_{21}(m_{\text{ч}}Si_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}^0Si_{\text{ч}}^0) + \delta m_{\text{в}} + \Delta m_{\text{в}}; \\ m_{\text{ш}}^p &= m_{\text{ш}}^0 - a_{30}(Mn_{\text{ч}} / Si_{\text{ч}} - Mn_{\text{ч}}^0 / Si_{\text{ч}}^0) - a_{31}(1 / C_3^{\text{min}} - 1 / C_{\text{ч}}^0) + \Delta m_{\text{ш}}, \end{aligned}$$

де  $m_{\text{вп}}^p$ ,  $m_{\text{в}}^p$ ,  $m_{\text{ш}}^p$  — відповідно маси добавок вапняку, вапна й плавикового шпату, т;  $a_{10}, \dots, a_{19}, \dots, a_{21}, a_{30}, \dots, a_{31}$  — умовно-постійні коефіцієнти;  $m_{\phi}$ ,  $m_{\text{ч}}$  — відповідно маса брухту й чавуну, т;  $t_3$ ,  $t_{\text{ч}}$  — відповідно задана

температура сталі та температура сталі на повалці, °C;  $Mn_q$  — вміст мангану в чавуні, %;  $C_c^{\min}, C_c$  — відповідно мінімальний заданий вміст вуглецю та вміст вуглецю на повалці, %;  $\tau_n$  — тривалість простою конвертера, хв;  $N_\phi$  — номер плавки за футерівкою;  $H$  — середньо-інтегральна відстань фурми до рівня спокійного металу, калібрів;  $\Delta m_{\text{ВП}}, \Delta m_{\text{В}}, \Delta m_{\text{Ш}}$  — поправочні коефіцієнти, т;  $\delta m_{\text{В}}$  — поправка до маси вапна у залежності від основності шлаку, т. Тут «0» приналежність параметра до «зразкової плавки»;  $\delta m_{\text{В}} = 3,0(B_3 - B^0)$ ,  $B$  — основність кінцевого шлаку.

«ККЦ»		31 січня 2011 г 12:24:56		Час/дата		Повідомлення		НС		
КОНВЕРТЕР №1 ЗМІНА 2		12:44:56 31.01.2011								
<b>РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВЕДЕННЮ ПЛАВКИ</b>										
№140043		ВАПНО	ДОЛОМИТ	ШПАТ	ВАПНЯК	ВУГЛІЦЯ	КАТУНИ	КИСЕНЬ	ФУРМА	СТЗСП
До продувки		3,00								До продувки
1 хв		0,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	400	4,50	1 хв
2 хв		2,50	00,00	0,25	00,00	00,00	00,00	400	3,50	2 хв
3 хв		0,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	400	3,00	3 хв
4 хв		2,50	00,00	00,00	00,00	00,00	0,00	400	2,50	4 хв
5 хв		0,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	400	1,20	5 хв
6 хв		0,00	00,00	00,00	00,00	00,00	0,00	380	1,00	6 хв
7 хв		0,50	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	380	1,00	7 хв
8 хв				00,00	00,00	00,00	0,00	380	1,00	8 хв
9 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	380	1,00	9 хв
10 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	380	1,00	10 хв
11 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	380	1,00	11 хв
12 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	400	1,00	12 хв
13 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	400	1,00	13 хв
14 хв				00,00	00,00	00,00	00,00	400	1,00	14 хв
Сум. витр.		8,50		0,25			0,00			Сум. витр.

Рис. 2. Приклад відеокадру «Рекомендації по веденню плавки»

Функціональні залежності, що входять до системи рівнянь, визначаються відповідно за формулами:

$$f_1(C) = C + a_{39} \exp(-k_{40}C),$$

$$f(N_\phi) = \begin{cases} a_{41} - a_{42}N_\phi, & \text{якщо } N_\phi \leq 15; \\ a_{43} + a_{44}N_\phi, & \text{якщо } N_\phi > 15, \end{cases}$$

$$f(\tau_n) = \begin{cases} a_{45}\tau_n, & \text{якщо } \tau_n < 60 \text{ хв}; \\ a_{46} + a_{47}\tau_n, & \text{якщо } 60 \text{ хв} \leq \tau_n \leq 240 \text{ хв}; \\ a_{48} + a_{49}\tau_n, & \text{якщо } \tau_n > 240 \text{ хв}, \end{cases}$$

де  $a_{39}, \dots, a_{49}$  — умовно-постійні коефіцієнти.

Якщо відсутній вапняк, охолодження плавки може бути виконано продувкою азотом. У такому випадку тривалість продувки ( $\tau_a$  хв) визначається за формулою:

$$\tau_a = \gamma m_{\text{ВП}}^{\text{р}}$$

де  $\gamma$  — умовно-постійний коефіцієнт.

Якщо розрахункове значення добавки плавикового шпату  $m_{\text{ш}}^{\text{р}} < 0$ , то приймають  $m_{\text{ш}}^{\text{р}} = 0$ .

Якщо розрахункове значення добавки вапняку  $m_{\text{вп}}^{\text{р}} < 0$ , тобто плавка фізично та хімічно холодна, то розраховують масу добавки нагрівача — вугілля  $m_{\text{вуг}}^{\text{р}}$ , т, за формулою:

$$m_{\text{вуг}}^{\text{р}} = -\frac{m_{\text{вп}}^{\text{р}}}{2,6}.$$

Розподілення сипких за добавками і момент уведення останніх встановлюється так само, як на «зразковій плавці».

Кількість теплоти, що виділяється в процесі, залежить від повноти проходження реакцій окиснення, яка, у свою чергу, визначається режимом дуття. Перерахунок рекомендацій із ведення плавки, що зв'язаний із відхиленням режиму дуття від заданого, проводять на 8-й хв продувки

$$m_{\text{вп}}^{\text{р8}} = m_{\text{вп}}^{\text{р}} + a_{19}(H^{1-8} - H^{0(1-8)}) + a_{51}(m_{\text{в}}^{\text{ф}} - m_{\text{вп}}^{\text{р}}) + a_{52}(m_{\text{ш}}^{\text{ф}} - m_{\text{ш}}^{\text{р}}),$$

де  $a_{51}, a_{52}$  — коефіцієнти;  $H^{1-8}$  — фактична середньо-інтегральна відстань фурми на 1–8 хв, калібрів. Тут  $a_1 = 0$ , якщо  $m_{\text{в}}^{\text{р}} \geq m_{\text{в}}$ ;  $a_2 = 0$  та  $k_2 = 0$ , якщо  $m_{\text{ш}}^{\text{р}} \geq m_{\text{ш}}$ ;  $a_1 = a_{17}$  — якщо  $m_{\text{в}}^{\text{р}} < m_{\text{в}}$ ;  $a_2 = a_{18}$ , якщо  $m_{\text{ш}}^{\text{р}} \geq m_{\text{ш}}$ .

Рекомендовані маси вапна та плавикового шпату не змінюються.

Модель розрахунку сипких на плавку з використанням кінцевого шлаку попередньої плавки має вигляд:

- ведення сипких на плавку проводиться відповідно до «зразкової плавки»;
- за відсутності «зразкової плавки» введення сипких проводиться відповідно до попередньої плавки, якщо вона продувалася із використанням кінцевого шлаку;
- у випадку відсутності «зразкової плавки» і попередньої плавки з продувкою з використанням кінцевого шлаку сипкі вводяться в такому порядку:
  - для підрозкиснення й загушення шлаку, що залишається вводиться вугілля марки АС в кількості 200 кг та вапно в кількості 1,0 т;
  - за витрати на продувку 3000 м<sup>3</sup> кисню проводиться проміжне скочування шлаку (присадка вапна в конвертер під час продувки до проміжного скочування шлаку не проводиться);
  - після скочування шлаку проводиться присадка 5,0 т вапна двома порціями.

Модель розрахунку загальної кількості кисню на звичайну плавку та керування режимом дуття наведено в [11].

### Динамічна модель

Модель розрахунку динамічних параметрів ванни конвертера складається із моделі динамічного розрахунку прогнозованої маси рідкої сталі, швидкості

зневуглецювання і вмісту вуглецю ванни конвертера під час продувки, моделі прогнозування температури ванни в процесі продувки, динамічної моделі додувки та моделі визначення необхідності і моменту проміжного скоочування шлаку.

Розрахунок прогнозованої маси рідкої сталі на випуску плавки  $m_{ст}^p$ , т, проводиться за формулою:

$$m_{ст}^p = \left( 1 - \gamma_1 \frac{\tau_{пр}}{\tau_{пр}^p} \right) \left[ m_{ч} + m_{б} \left( 1 - e^{-\gamma_2 \cdot \varphi(\mu, m_b) \frac{\tau_{пр}}{\tau_{пр}^p}} \right) \right],$$

де  $\gamma_1, \gamma_2$  — умовно-постійні коефіцієнти;  $\varphi(\mu, m_b)$  — функція, що залежить від насипної щільності брухту  $\mu$  та маси брухту. Для вагового брухту  $\varphi(\mu, m_b) = 0,7 m_b / m_{ср}$ , для брухту середньої насипної щільності  $\varphi(\mu, m_b) = 1,0 m_b / m_{ср}$ , для легковагового —  $\varphi(\mu, m_b) = 1,5 m_b / m_{ср}$ . За відсутності інформації про насипну щільність брухту  $\varphi(\mu, m_b) = 1,0 m_b / m_{ср}$ . Тут  $m_{ср}$  — умовно-постійна величина.

Швидкість зневуглецювання металу  $V_c$ , %/хв визначається за хімічним складом газів, що відходять

$$V_c = \frac{0,536(CO + CO_2)}{(1 + t_r)m_{ст}^p}$$

де CO, CO<sub>2</sub> — відповідно вміст окису й двоокису вуглецю в газах, що відходять, %;  $v_r$  — витрата газів, що відходять, м<sup>3</sup>/хв;  $\alpha$  — коефіцієнт об'ємного розширення газів, що відходять, який дорівнює 1/273 °C<sup>-1</sup>;  $t_r$  — температура газів, що відходять, °C.

За відсутності виміру витрати газів, що відходять, останні визначаються за балансом аргону й азоту

$$v_r = \frac{Ar_{п} N_{2д} - Ar_{д} N_{2п}}{Ar_{п} N_{2г} - Ar_{г} N_{2п}} v,$$

де  $Ar_{п}, Ar_{д}, Ar_{г}$  — відповідно вміст аргону в повітрі, дутті й газах, що відходять, %;  $N_{2п}, N_{2д}, N_{2г}$  — відповідно вміст азоту в повітрі, дутті й газах, що відходять, %;  $v$  — витрата дуття, м<sup>3</sup>/хв.

Прогнозований вміст вуглецю в металі по ходу продувки визначається за балансом вуглецю

$$C_{г}^p = \frac{C_{ч} m_{ч} + C_{б} m_{б} + C_{в} m_{в}^p}{m_{ст}^p} - \int_0^{\tau_{пр}} V_c d\tau,$$

де  $C_{б}, C_{в}$  — відповідно вміст вуглецю у брухті й вапні, %. Тут вміст вуглецю в чавуні визначається за хімічним складом чавуну та його температурою

$$C_{ч} = k_0 + k_1 Si_{ч} + k_2 Mn_{ч} + k_3 P_{ч} + k_4 S_{ч} + k_5 t_{ч},$$

де  $k_0 - k_5$  — умовно-постійні коефіцієнти;  $S_{ч}$  — вміст сірки в чавуні.

Вміст вуглецю в брухті визначається як середньомасове із його вмісту в окремих складових. У випадку відсутності інформації про його вміст в окремих складових брухту вміст вуглецю в брухті приймається таким, що дорівнює його значенню в марці сталі, яка виплавляється.

Вміст вуглецю у вапні визначається аналізом його проб. За відсутності результатів аналізу приймається таким, що дорівнює  $0,012m_B$ .

В останній фазі продувки вміст вуглецю в металі визначається за формулою:

$$C_r^p = \sqrt{1/(\beta_1/V_c + \beta_2)} \text{ при } \tau_{пр} \geq 0,8\tau_{пр}^p,$$

де  $C_r^p$  — вміст вуглецю в металі, що визначений за допомогою газового аналізу;  $\beta_1, \beta_2$  — умовно-постійні коефіцієнти.

Динамічна модель контролю температури конвертерної ванни подано в [12].

Динамічна модель додувки, запускається при вимірі температури  $t_n$  та вмісту вуглецю в металі  $C_n$  під час повалки конвертера. Динамічний розрахунок вмісту вуглецю  $C^p$  і температури металу  $t^p$  на додувку проводять за формулами:

$$C_r^p = C_n + \frac{m_{\text{вуг}}^d}{m_{\text{ст}}^p} 10^{-1} - \int_0^{\tau_d} V_c d\tau; \quad t_r^p = t_n + \eta_1 \int_0^{\tau_d} V_c d\tau + \eta_2 \sum_0^{\tau_d} m_{\text{вп}}^{\text{дпп}} + \eta_3 m_{\text{вуг}}^d + \eta_4.$$

За відсутності інформації про газовий аналіз або при вмісті вуглецю на повалці нижче 0,2 % — за формулою:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\tau(n+1)}^p = C_{\tau(n)}^p + \eta_5 (\Delta V_{\tau(n+1)}^d - \Delta V_{\tau(n)}^d), \quad C_{\tau(0)}^p = C_n; \\ \eta_5 = \begin{cases} \beta_3, & \text{якщо } C_{\tau}^p > 0,25; \\ \beta_4, & \text{якщо } 0,10 < C_{\tau}^p \leq 0,25; \\ \beta_5, & \text{якщо } 0,07 < C_{\tau}^p \leq 0,10; \\ \beta_6, & \text{якщо } C_{\tau}^p \leq 0,07; \end{cases} \\ t_{\tau}^p = t_n + \beta_7 \Delta V_{\tau}^d + \beta_8 \sum m_{\text{вп}}^{\text{дпп}} + \beta_9 m_{\text{вуг}}^d + \beta_{10}, \end{array} \right.$$

де  $m_{\text{вуг}}^d, \sum_0^{\tau_d} m_{\text{вп}}^{\text{дпп}}$  — маса вуглецьвміщуючих матеріалів і сумарна наведена

маса вапняку на додувці плавки, т;  $\tau_d$  — тривалість додувки, с;  $\eta_1 - \eta_6, \beta_3 - \beta_{10}$  — умовно-постійні коефіцієнти;  $\Delta V_{\tau}^d$  — поточні сумарні витрати кисню на додувку плавки (з моменту виміру  $C_n$  та  $t_n$ ),  $\text{м}^3$ ;  $n$  — часовий

крок ітерації, що дорівнює 10 с. Тут  $\sum_0^{\tau_d} m_{\text{вп}}^{\text{дпп}} = \sum_{i=1}^{\kappa} m_{\text{вп}i} + 0,4 \sum_{j=1}^p m_{\text{в}j}$ , де

$m_{\text{вп}i}, m_{\text{в}j}$  — відповідно маса  $i$ -ї добавки вапняку й  $j$ -ї добавки вапна, т.

Результати прогнозу температури ванни та вмісту вуглецю виводяться на екран монітора кожні 10 сек (рис. 3).



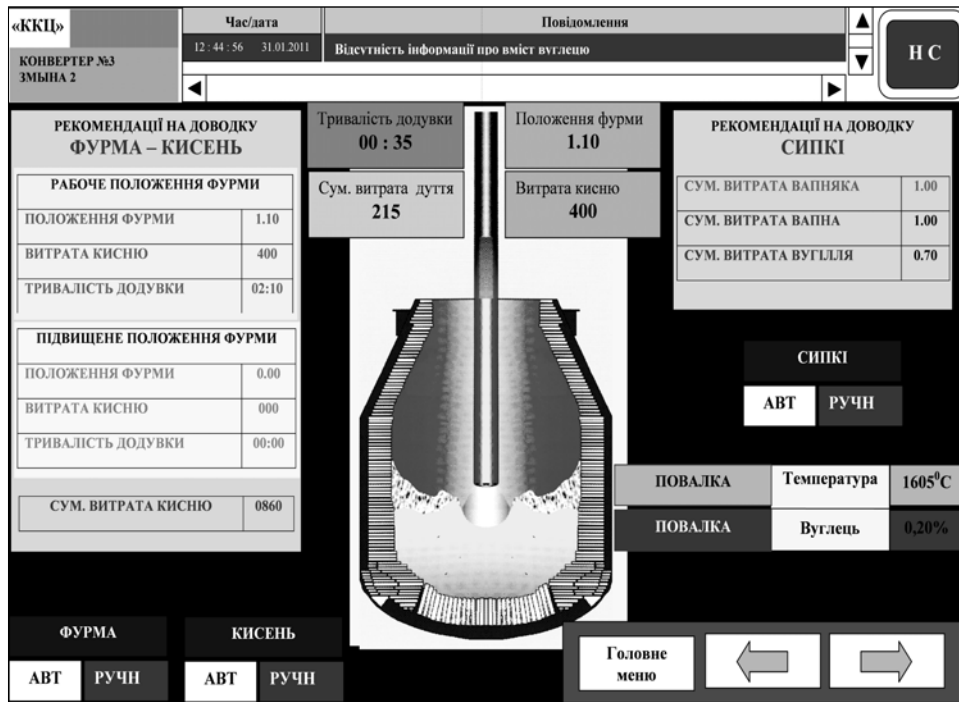


Рис. 3. Приклад відеокадру «Додувка»

Проміжне скочування шлаку проводиться за таких ознак:

- $\varepsilon_1 = 1$  — ознака плавки зі зменшеною витратою вапна;
- $\varepsilon_2 = 1$  — ознака використання кінцевого шлаку попередньої плавки;
- $\varepsilon_3 = 1$  — ознака фізично й хімічно гарячого чавуну;
- $\varepsilon_4 = 1$  — ознака використання металобрухту з підвищеною забрудненістю й ошлакованістю;
- $\varepsilon_5 = 1$  — ознака виплавки марок сталі 35ГСм, 25Г2См, 25ХГНМА.

Необхідність проміжного скочування шлаку інших плавок визначається за «зразковою плавкою». Момент скочування шлаку  $\tau_{ск}$  за «зразковою плавкою» визначається за формулою:

$$\tau_{ск} = \begin{cases} \tau_{ск}^0, & \text{якщо } V_c \leq V_{ссс}^0; \\ \tau_{ск}^0 + \Delta\tau, & \text{якщо } V_c > V_{ссс}^0, \end{cases}$$

де  $\tau_{ск}^0$  — тривалість продувки до моменту скочування шлаку за «зразковою плавкою»;  $\Delta\tau$  — тривалість продувки до моменту  $V_{ссс} = V_{ссс}^0$ . Тут для плавок із ознакою  $\varepsilon_1 = 1$  значення  $\tau_{ск} \leq 8$  хв; для плавок із ознакою  $\varepsilon_2 = 1$  значення  $\tau_{ск} \leq 9$  хв; для плавок з ознакою  $\varepsilon_3 = 1$  значення  $\tau_{ск} \leq 12$  хв; для плавок із ознакою  $\varepsilon_4 = 1$  значення  $\tau_{ск} \leq 10$  хв; для плавок із ознакою  $\varepsilon_5 = 1$  значення  $\tau_{ск} \leq 10$  хв.

За відсутності інформації про швидкість зневуглицювання ( $V_c \leq 0,05$ ),  $\tau_{ск}$  приймається таким, що дорівнює  $\tau_{ск}^0$ . За відсутності «зразкової плавки» момент скочування шлаку визначається за попередньою плавкою, за відсут-

ності скочування шлаку в попередній плавці момент визначається таким чином: для плавки із ознакою  $\varepsilon_1 = 1$  значення  $\tau_{\text{ск}} = 7,5$  хв; для плавки із ознакою  $\varepsilon_2 = 1$  значення  $\tau_{\text{ск}} = 8$  хв; для плавки із ознакою  $\varepsilon_3 = 1$  значення  $\tau_{\text{ск}} = 11,5$  хв; для плавки із ознакою  $\varepsilon_4 = 1$  значення  $\tau_{\text{ск}} = 9,5$  хв; для плавки із ознакою  $\varepsilon_5 = 1$  значення  $\tau_{\text{ск}} = 9,5$  хв.

Модель розкиснення плавки наведено в [10].

## ВИСНОВКИ

Модель пройшла промислові іспити за даними керування 350-тонними конвертерами ВАТ «Металургійний комбінат „Азовсталь”». Результати іспитів — вихід придатного збільшився в середньому на 0,9 %, стійкість футерівки збільшилась на 3 %. Кількість плавки, що не потребували коректування збільшилась на 10–15 %. Кількість контрольованих плавки становить 90 % від кількості проведених (не контролюються плавки, що проходять з порушенням технологічного режиму).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чернеча Д.Ф., Богушевський В.С., Готвянський Ю.Я. та ін. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. — К.: Вища шк., 2006. — 503 с.
2. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. — Челябинск: Металлургия, 1988. — 480 с.
3. Богушевський В.С., Оробцев Ю.В., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А. Математическая модель АСУ конвертерной плавкой. — К.: НПК «Киевский институт автоматики», 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). — Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. — 454 с.
5. Богушевський В.С., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. — К.: НПО «Киевский институт автоматики», 1992. — 168 с.
6. Bogushevsky V., Sharbatian M., Suhenko V. Automatic control of converter process // Materialy IV Mezinarodni Vedecko-Practicka Ronference «Evropska Veda XXI Stoleti–2008», 16–30 kvetna 2008 roku. — P. 26–29.
7. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю. Про використання детермінованого підходу при побудові математичної моделі конвертерного процесу // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. — К.: «Політехніка», 2009. — С. 228–233.
8. Богушевський В.С., Грабовський Г.Г., Михайлов В.М. и др. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки // Сталь. — 2006. — № 1. — С. 18–21.
9. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А., Жук С.В. Реализация модели управления конвертерной плавкой в системе принятия решений // Автоматика. Автоматизация. Электричні комплекси та системи. — 2010. — № 1 (25). — С. 101–105.
10. Богушевський В.С., Сергеева К.О., Жук С.В. Автоматизована система керування конвертерною плавкою // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. — 2011. — 2, № 61. — С. 147–151.
11. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю., Шматко О.В. Математична модель і система керування режимом дуття конвертерної плавки // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. — 2011. — 2, № 61. — С. 38–43.
12. Богушевський В.С., Сергеева К.О., Сухенко В.Ю., Жук С.В. Розрахунок металевий частини шихти киснево-конвертерної плавки // Металургическая и горнорудная промышленность. — 2010. — № 7. — С. 266–269.

Надійшла 17.05.2011