

СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У КЕРУВАННІ РЕЖИМОМ ДУТТЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

В.С. БОГУШЕВСЬКИЙ, В.Ю. СУХЕНКО

Наведено критерій оптимізації керування режимом дуття із мінімізацією комплексу квадратичних відхилень по вмісту вуглецю, сірки, а також температури сталі. Сформульовано принцип побудови моделей керування за плавками позитивного досвіду. В модель включено програмну частину (детерміновану) та додаткове керування (статистичну). Розглянуто вплив дрейфу об'єкту на результати керування. Представлено діапазони зміни керуючих діянь для конверторів ємністю 130 тон. Конкретну реалізацію моделі представлено рівняннями статичного та динамічного керування. Розглянуто взаємодію дистрибутора із системою керування у процесі проведення плавки. Розроблені моделі реалізовано у системі керування режимом дуття у складі АСУТП конвертерної плавки на ВАТ «Арселорміттал, Кривий Ріг».

ВСТУП

Серед способів виплавки сталі киснево-конвертерний є одним із найбільш складних за природою і методами керування, особливо оперативного. Керування здійснюється в умовах неповноти інформації, тому що на сучасному рівні розвитку техніки неможливо здійснити прямі виміри основних вихідних координат — складу металу та його температури.

З розгляду математичних моделей виходить, що за достатньо великого їх різноманіття відсутня загальна методологія їх побудови і оцінювання [1–4]. Існують статичні й динамічні моделі процесу, але динамічні не можуть забезпечити задану точність, тому що в основному вони є статистичними і мають низку недоліків.

Мета роботи — побудова моделі керування режимом дуття конвертерної плавки, що включає досвід проведення плавки кращих операторів.

КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ

Сформульований критерій оптимізації має вигляд:

$$I(V, \bar{H}, v_{\text{П}}, H_{\text{П}}) = \alpha_1 M(C_M - C^*)^2 + \alpha_2 M(t_M - t^*)^2 + \alpha_3 M(S_M - S^*)^2 \quad (1)$$

за обмежень:

- $V \geq V_{\text{ф}}$, де $V_{\text{ф}}$ — фактичний об'єм кисню на плавку (м^3) із умов окиснення потрібної кількості вуглецю, силіцію й мангану;
- $\bar{H}_{\text{min}} \leq \bar{H} \leq \bar{H}_{\text{max}}$ — забезпечення нормальних умов шлакоутворення;

- $V_{\min} \leq V_{\Pi} \leq V_{\max}$ — відповідає проектній продуктивності конвертера, мінімальне значення не може бути меншим того, за якого забезпечується задана продуктивність конвертера, а максимальне — визначається прохідною здатністю газовідводячого тракту;
- $H_{\min} \leq H_{\Pi} \leq H_{\max}$ — забезпечує підтримання поточного значення висоти положення фурми над рівнем спокійного металу у межах, що передбачені технологічною інструкцією, так як, якщо фурму занадто опустити можливе розмивання днища конвертера, якщо підняти вище метало-шлакогазової емульсії — нетехнологічна продувка, за якої проходить переокиснення шлаку).

У формулі (1) визначено наступні керуючі діяння: V — загальні витрати дуття на плавку (м^3); \bar{H} — середньоінтегральна відстань кінцевика фурми від рівня спокійного металу (калібр); v_{Π} — поточне значення інтенсивності продування ($\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{хв.})$); H_{Π} — поточне значення відстані кінцевика фурми від рівня спокійного металу (калібр); $\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9$ — коефіцієнти, що визначаються масштабами змінних, які входять у критерій (нормування параметрів), а також залежать від співвідношення для конкретної плавки частот додувок через непопадання по вуглецю C_M (%), температурі t_M ($^{\circ}\text{C}$) та сірці Si_M (%), відповідно; M — знак математичного очікування; C^*, t^*, S^* — «точки прицілу» по вуглецю, температурі й сірці у металі, що визначаються за нормальної технологічної ситуації маркою сталі, а в інших випадках — методом експертних оцінок у 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. Задачею оптимізації на конкретну плавку є знаходження таких значень керуючих діянь, за яких $I \rightarrow \min$.

Чисельні значення коефіцієнтів $\alpha_1 - \alpha_3$ знаходять на кожен плавку в залежності від початкових і кінцевих (заданих) умов. Нами було визначено вплив початкових та кінцевих умов на імовірність потрапляння плавки у задані межі після продувки [5]. Для цього розраховано імовірності появи наступних подій, що можуть привести до необхідності коректування плавки, NC — додувки по вуглецю, NQ — нагрівання металу після продувки, NT — охолодження металу, NS — додувка для видалення сірки (чисельні значення коефіцієнтів наведені для конверторів садкою 130 тонн) (табл. 1–4).

Таблиця 1. Вплив параметрів початкових і кінцевих умов на додувки по вуглецю

Параметр, p	$NC(p)$, %	r	σ , %	P
$C_{\text{ч}}$	$-19,8 + 13,5 C_{\text{ч}}$	0,187	23,1	$< 0,900$
$Si_{\text{ч}}$	$65,2 - 59,9 Si_{\text{ч}}$	0,659	13,0	$> 0,950$
$Mn_{\text{ч}}$	$9,92 + 29,5 Mn_{\text{ч}}$	0,310	18,6	$< 0,900$
$P_{\text{ч}}$	$36,5 - 310 P_{\text{ч}}$	0,227	18,4	$< 0,900$
$S_{\text{ч}}$	$42,2 + 1900 S_{\text{ч}}$	0,830	9,8	$> 0,950$

Продовження табл. 1

C_3	$1,66 + 167C_ч$	0,987	7,6	$> 0,950$
$(S_ч - S_3)/S_3$	$30,2 + 19(S_ч - S_3)/S_3$	0,331	18,2	$< 0,900$
V_{II}	$-117 + 3,33V_{II}$	0,905	8,8	$> 0,950$
Q_{II}	$-48,4 + 0,071Q_{II}$	0,890	8,9	$> 0,950$

Оцінюючи вплив параметрів початкових і кінцевих умов на додувки по вуглецю було визначено коефіцієнт парної кореляції (r), середньоквадратичне відхилення (σ), достовірність коефіцієнта кореляції (P).

Рівняння множинної регресії має вигляд:

$$NC = 13,3 + 22C_ч - 11,2Si_ч + 22,9Mn_ч - 2070 P_ч + 130C_3 + \\ + 16,8(S_ч - S_3)/S_3 - 2,98V_{II} + 0,000114Q_{II}. \quad (2)$$

Коефіцієнт множинної кореляції: $R = 0,673$; $\sigma = 14,2\%$; $P > 0,950$.

Таблиця 2. Вплив параметрів початкових і кінцевих умов на нагрівання металу після продувки

Параметр, p	$NQ(p)$, %	r	σ , %	P
$C_ч$	$-248 + 64,1C_ч$	0,680	14,1	$< 0,900$
$Si_ч$	$50,2 - 18,8Si_ч$	0,258	23,5	$< 0,900$
$Mn_ч$	$102,9 - 91,8Mn_ч$	0,955	7,2	$> 0,950$
$P_ч$	$-69,7 + 1950P_ч$	0,834	9,5	$> 0,900$
$S_ч$	$22,3 + 134S_ч$	0,134	24,2	$< 0,900$
C_3	$12,5 + 107C_3$	0,714	14,1	$> 0,950$
$(S_ч - S_3)/S_3$	$47,1 - 35,7(S_ч - S_3)/S_3$	0,542	15,8	$> 0,950$
V_{II}	$160 - 2,62V_{II}$	0,514	16,1	$> 0,950$
Q_{II}	$182 - 0,138Q_{II}$	0,939	7,6	$> 0,950$

Рівняння множинної регресії має вигляд:

$$NQ = 134 + 41,5C_ч - 7,45Si_ч - 16,2Mn_ч + 46,6P_ч - \\ - 84,6C_3 - 38,3(S_ч - S_3)/S_3 - 2,05V_{II} - 0,000121Q_{II}. \quad (3)$$

Таблиця 3. Вплив параметрів початкових і кінцевих умов на охолодження металу

Параметр, p	$NQ(p)$, %	r	σ , %	P
$C_ч$	$157 - 27,5C_ч$	0,314	25,3	$< 0,900$
$Si_ч$	$66,4 - 58,5Si_ч$	0,601	13,1	$> 0,950$
$Mn_ч$	$-50,4 + 108Mn_ч$	0,956	7,6	$> 0,990$
$P_ч$	$164 - 2330P_ч$	0,230	25,5	$< 0,900$
$S_ч$	$-17,2 + 1210S_ч$	0,738	13,8	$> 0,950$

Продовження табл. 3

C_3	$66,4 - 149C_3$	0,864	9,6	$> 0,950$
$(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	$29 + 35,1(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	0,526	13,1	$> 0,950$
$V_{\text{п}}$	$-53,5 + 2,02V_{\text{п}}$	0,934	7,7	$> 0,990$
$Q_{\text{п}}$	$182 - 0,138Q_{\text{п}}$	0,624	13,3	$> 0,950$

Рівняння множинної регресії має вигляд:

$$\begin{aligned}
 NT = & -1,52 - 10,9C_{\text{ч}} - 22,8Si_{\text{ч}} + 26,4Mn_{\text{ч}} - 568P_{\text{ч}} + \\
 & + 0,51C_3 + 27,9(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3 + 1,61V_{\text{п}} + 0,000152Q_{\text{п}}, \quad (4) \\
 R = & 0,787; \sigma = 12,9\%; P > 0,950.
 \end{aligned}$$

Таблиця 4. Вплив параметрів початкових умов на додувку для видалення сірки

p	$NS(p), \%$	r	$\sigma, \%$	P
$C_{\text{ч}}$	$111,1 - 22,3C_{\text{ч}}$	0,437	15,2	$< 0,900$
$Si_{\text{ч}}$	$39,9 - 40,6Si_{\text{ч}}$	0,929	6,7	$> 0,990$
$Mn_{\text{ч}}$	$19,9 - 8,74108Mn_{\text{ч}}$	0,450	23,1	$< 0,900$
$P_{\text{ч}}$	$10,8 - 47P_{\text{ч}}$	0,087	25,1	$< 0,900$
$S_{\text{ч}}$	$-6,07 + 378S_{\text{ч}}$	0,735	13,9	$> 0,950$
C_3	$4,21 + 44,9C_3$	0,998	5,7	$> 0,990$
$(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	$17,7 - 7,69(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	0,542	23,0	$< 0,900$
$V_{\text{п}}$	$146 - 2,51V_{\text{п}}$	0,953	7,7	$> 0,950$
$Q_{\text{п}}$	$103 + 0,093Q_{\text{п}}$	0,720	9,7	$> 0,950$

Рівняння множинної регресії має вигляд:

$$\begin{aligned}
 NS = & -6,89 - 16,7C_{\text{ч}} - 36,1Si_{\text{ч}} - 5,49Mn_{\text{ч}} + 98,4P_{\text{ч}} + \\
 & + 110C_3 + 11,6(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3 + 4,42V_{\text{п}} - 0,000111Q_{\text{п}}, \quad (5) \\
 R = & 0,685; \sigma = 10,7\%; P > 0,950.
 \end{aligned}$$

Тут $C_{\text{ч}}$, $Si_{\text{ч}}$, $Mn_{\text{ч}}$, $P_{\text{ч}}$, $S_{\text{ч}}$ — відповідно вміст вуглецю, силіцію, мангану, фосфору і сірки в чавуні, %; S_3 — заданий вміст сірки в сталі, %; $V_{\text{п}}$ та $Q_{\text{п}}$ відповідно значення кисневого, м³/т металошихти, і теплового потенціалу ванни, кДж/т.

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

ПРИНЦИП СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ

Математичний опис технології киснево-конвертерної плавки включає статичне, динамічне і замкнуте керування плавкою, а також керування довод-

кою плавки після проміжного вимірювання параметрів ванни занурювальним зондом чи повалки конвертера.

Маючи вибірку траєкторій керування плавкою, що були успішно проведені ($\vec{U}_1[\tau], \dots, \vec{U}_n[\tau]$), можна виділити в реальній траєкторії керування $\vec{U}_i[\tau]$ дві складові: програмну частину $\vec{U}_{i\text{пр}}[\tau]$ та додаткове керування $\Delta\vec{U}_i[\tau]$, що пов'язано як із нечітким визначенням вихідного стану плавки, так і з дією перешкод. Таким чином, стратегія керування не може бути зведена лише до детермінованої, а містить детерміновану частину по вибору програми і стохастичну для додаткових керуючих дій [6].

Представимо траєкторію керування $\vec{U}_i[\tau]$ для кожної плавки позитивного досвіду, $i = 1, \dots, n$, у вигляді кусочно-безперервної кривої в багатовимірному просторі за допомогою одиничних ступінчастих функцій $1(\tau - \tau_i)$. Ті керуючі дії $U_{ij}[\tau]$, які реалізуються у вигляді уставок, що чергуються у часі (витрати дуття, відстань сопла фурми до рівня спокійної ванни), можна безпосередньо виразити через одиничну ступінчасту функцію.

Дві траєкторії керування $\vec{U}_i[\tau]$ і $\vec{U}_j[\tau]$ відповідно для i -ї і j -ї плавки вибірки порівнюються між собою за допомогою міри з векторною ваговою функцією.

Отриману відстань $d(\vec{U}_i[\tau], \vec{U}_j[\tau])$ між траєкторіями керування відповідно для i -ї й j -ї плавки використовували для розбиття траєкторій керування на класи S_1, S_2, \dots, S_k , так, щоб кожному класу S_i відповідала траєкторія керування $S_i \sim \{U_{i1}[\tau] \dots U_{ik}[\tau]\}$, яка представляє собою реалізацію однієї програми керування $\vec{U}_{i\text{опт}}[\tau]$ із різними додатковими керуючими діями $\Delta\vec{U}_i[\tau]$. Цю умову можливо виконати шляхом відповідного вибору функцій ваги так, щоб відстань між траєкторіями керування, що знаходяться у одному класі й потребують однакової програми керування, була меншою, ніж відповідна відстань $d(\vec{U}_i[\tau], \vec{U}_v[\tau])$ для траєкторій, що реалізують різні програми керування.

Розбиваючи плавки на класи виникає протиріччя, що пов'язане із наступним: якщо межі зміни будь-якого параметра в класі взяти вузькими, то значно зростає кількість класів, а якщо взяти широкими, то відхилення параметра у межах класу буде потребувати додаткового керування.

В процесі проведення плавки, спостерігаючи за дією різних перешкод на якість металу і оцінюючи за непрямыми спостереженнями відхилення ходу плавки від нормального, дистрибуторщик (оператор конвертера) дослідним шляхом підбирає додаткове керування $\Delta\vec{U}[\tau]$, що найбільш ефективно діє у кожному конкретному випадку.

Дослідження, проведені нами, показують, що вплив кожного вхідного параметра в діапазоні його зміни в одному класі на вихідні параметри може бути без значної похибки описаний лінійною залежністю. Це дозволяє доповнити модель коректуючими факторами вигляду [7]:

$$\Delta \bar{U}_i = \alpha_j (x_j^0 - x_j), \quad (6)$$

де $\Delta \bar{U}_i$ — коректуючий фактор по i -му керуючому діянню; α_j — статистичний коефіцієнт зв'язку для j -го параметра; x_j^0 та x_j — відповідно значення j -го параметра на зразковій та поточній плавці.

Поточна і зразкова плавки можуть знаходитись на значній відстані за часом одна від одної (на декілька діб). На результати керування у такому випадку буде впливати дрейф об'єкта (зношення фурми, футерівки конвертера, зміна хімічного складу шлакоутворюючих і охолоджуючих матеріалів, тощо).

Поправочні коефіцієнти зв'язані з дрейфом об'єкта та визначаються в залежності від похибок керування на попередніх плавках незалежно від класу, до якого належала зразкова плавка. Ці похибки сумують із вибраною програмою. За цих умов проходить адаптивна корекція керуючих величин

$$\varepsilon_i(n) = x_i(n) - x_{i3}(n), \quad (7)$$

де n — номер плавки, $x_i \in V, \bar{H}, v_{\Pi}, H_{\Pi}$.

За величиною похибки формується поправка $\Delta x_i(n)$. Корекція програми проводиться по формулі 8:

$$x_i(n) = x_i(n-1) + \Delta x_i(n) = x_i(n-1) + \gamma_i f[\varepsilon_i(n-1)], \quad (8)$$

де γ_i — коефіцієнт підсилення в контурі адаптивної корекції; $\varepsilon_i(n-1)$ — похибка на попередній плавці незалежно від класу, в якому вона знаходиться; f — функціональна залежність, що визначається величиною похибки і забезпечує збіжність процесу до її мінімізації.

Задача знаходження функції f ускладнюється тим, що вона включає дві складові — регулярну, що пов'язана з повільною зміною технологічного процесу (зношення футерівки і фурми, зміна хімічного складу вапна і чавуна в міксері тощо), і випадкову, що пов'язана з різкими змінами технологічного процесу (заміна фурми, введення охолоджуючих матеріалів різного виду, злив чавуна із різних міксерів, виплавка сталі різних марок тощо).

Дослідження процесу показали, що регулярна складова повністю визначається попередньою плавкою, а для зменшення негативного впливу випадкової складової адаптації за попередньою плавкою недостатньо. У загальному випадку поправки визначаються за формулою:

$$\Delta x_i(n) = \beta_1 \Delta x_i(n-1) + \beta_2 \Delta x_{i\phi}(n-1), \quad (9)$$

де β_1, β_2 — вагові коефіцієнти, що визначаються статистично; $\Delta x_i(n-1)$ — поправка до i -го керуючого діяння $(n-1)$ -ї плавки, що визначається як середньоарифметичне значення з поправок на попередніх плавках; $\Delta x_{i\phi}(n-1)$ — фактичне значення поправки із умов отримання на попередній плавці нульової помилки керуючого діяння.

Коефіцієнти β_1 та β_2 визначаємо, мінімізуючи функціонал за масивом із n плавко:

$$\Phi(\beta) = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x(n)_i - \Delta x(n)_{i\Phi}|}{\sum_{i=1}^n |\Delta x(n)_{i\Phi}|} \rightarrow \min, \quad (10)$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} 0 \leq \beta_m \leq 1; \\ \beta_2 = 1 - \beta_1, \end{cases} \quad (11)$$

де $m \in 1, 2$.

Мінімальна похибка керуючих параметрів «статичної» моделі відповідає значенням вагових коефіцієнтів $\beta_1 = 0,7$ та $\beta_2 = 0,3$.

Поправочний коефіцієнт ΔV , т, для сумарної витрати кисню на наступну плавку розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} \Delta V = V - V^p - k_1[f_1(C_n) - f_1(C_3^{\min})] - [f_2(m_{\text{вп}}) - f_2(m_{\text{вп}}^p)] + \\ + k_2(m_b - m_b^p) + k_3 \Delta m_{\text{ш}} + k_4(\bar{H} - \bar{H}^0), \end{aligned} \quad (12)$$

де V , ΔV^p — відповідно фактична і розрахована сумарна витрата кисню на поточну плавку, м³; $C_{\text{п}}$, C_3^{\min} — вміст вуглецю на повалці плавки й заданий маркою його мінімальний вміст, %, $m_{\text{вп}}$, m_b — відповідно маса вапняку і вапна на плавку, т; $k_1 - k_4$ — статистичні коефіцієнти; $f_1 - f_2$ — функціональні залежності, наведені в [8].

За відсутності «плавки позитивного досвіду» як зразкові використовуються параметри попередньої плавки.

У наслідок впливу шумів процесу і похибок у визначенні значень вихідних і керуючих параметрів кількість плавок у такті для уточнення коефіцієнтів рівнянь має бути як можна більшою. З іншого боку внаслідок дрейфу характеристик об'єкта ця кількість має бути як можна меншою. Дослідженнями, що проведені нами, встановлено, що оптимальна кількість плавок для коректування коефіцієнтів, за якої досягається мінімальна похибка системи дорівнює 15.

Можливі два підходи при коректуванні коефіцієнтів:

- коефіцієнти коректуються після кожної плавки;
- у масиві з 15 плавок коефіцієнти не змінюються.

У випадку застосування першого підходу безперервно коректується масив шляхом видалення з нього першої плавки і включення останньої. Перший підхід заслуговує на більшу увагу, але потребує більшого обсягу розрахунків.

Алгоритм керування продувкою у **динамічному режимі** з елементами замкненого керування складений за плавками позитивного досвіду за керуючими каналами витрат кисню, положення фурми і дозування сипких матеріалів. Перевірка плавок на достовірність інформації додатково проводиться тільки за параметрами: акустична характеристика продувки та кількість теплоти, що уноситься з водою, яка охолоджує фурму. Класифікація зразкових

плавков проводиться відповідно до табл. 5. Керування інтенсивністю ведення дуття зводиться до визначення його фіксованих значень по ходу продувки.

Таблиця 5. Діапазони параметрів при формуванні «плавков позитивного досвіду»

Найменування параметра	Діапазони, що перевіряються	
	Границі	Кількість
Вміст вуглецю в сталі на повалці, %	$\leq 0,06; 0,07 - 0,10; 0,11 - 0,15; > 0,15$	4
Тривалість простою, хв.	$< 25; 25 - 60; > 60$	3
Температура чавуна, °С	$< 1240; 1240 - 1280; 1281-1320; 1321 - 1360; >1360$	5
Маса чавуна, т	$< 125; 125 - 128; 129 - 132; 133 - 136; > 136$	5
Маса брукту, т	$< 30; 30 - 33; 34 - 37; 38 - 40; > 40$	5
Вміст силіцію в чавуні, %	$< 0,70; 0,70 - 1,00; >1,00$	3
Вміст мангану в чавуні, %	$< 0,40; 0,40 - 0,70; > 0,70$	3
Вміст сірки в чавуні, %	$< 0,020; 0,021-0,025; 0,026-0,030; > 0,031$	4
Температура сталі на повалці, °С	$<1580; 1581 - 1600; 1601 -1620; >1620$	4
Вміст фосфору в чавуні, %	$< 0,020; 0,021-0,025; 0,026 -0,030; > 0,030$	4

Модель доведення передбачає визначення діянь за «зразковими» плавкам [9, 10, 11]. Коли ми маємо дані про температуру і масову частку вуглецю у ванні, класифікація плавков вже інша, ніж була при статичному і динамічному керуванні. Плавки мають інші межі діапазону. Діапазон вимірювання параметрів наведений у табл. 6. Розрахунок охолоджуючого матеріалу (вапняку) і сумарних витрат кисню на доведення плавки проводиться при визначенні вмісту вуглецю у металі на останній фазі продувки за допомогою зонду $C_{зд}$

$$m_{вп}^p = m_{вп}^o - 0,045(\Delta t^o - \Delta t^p) - 4,5(\Delta C^o - \Delta C^p); \quad (14)$$

$$\Delta V^p = \Delta V^o - [\varphi(C_M^o) - \varphi(C_M^p)] - 100(m_{вп}^p - m_{вп}^o), \quad (15)$$

де $\Delta t^o, \Delta t^p$ — потрібна зміна температури при доведенні плавки, °С; $\Delta C^o, \Delta C^p$ — потрібна зміна вмісту вуглецю у металі під час операції доведення плавки, %; C_M^o, C_M^p — відповідно вміст вуглецю у металі на «зразковому» доведенні та поточному, %; «о», «р» — відповідно індекс зразкової й поточної плавков.

Тут,

$$\varphi(C) = \begin{cases} 5000 \cdot C & \text{якщо } C \leq 0,1\%; \\ 340 - 1600 \cdot C & \text{якщо } C > 0,1\%. \end{cases} \quad (16)$$

Таблиця 6. Діапазон вимірювання параметрів під час формування бази даних «зразкових» плавок для доведення

Параметр	Діапазон	
	Межі діапазону	Кількість
Маса садки, т	< 160; 160 – 165; > 165	3
Зміна вмісту вуглецю у металі, при доведенні, %	< 0,10; 0,10 – 0,20; > 0,20	3
Зміна температури металу під час доведення, °С	<10; 10 – 20; 21 – 30; 31 – 40; 41 – 50; >50	6
Задана температура сталі, °С	<1570; 1570 – 1585; 1586 – 1600; 1601 – 1615; >1615	5
Заданий мінімальний вміст вуглецю у сталі, %	< 0,05; 0,05 – 0,06; 0,07 – 0,10; 0,11 – 0,15; > 0,15	5

Положення фурми та інтенсивність подання кисню на доведення встановлюються рівними їх значенню на «зразковому» доведенні $H^P = H^0$, $v^P = v^0$.

За умов $m_{\text{вп}}^P \leq 0$, тобто в плавці, що потребує нагрівання

$$\Delta H^P = -0,004 \cdot m_{\text{вп}}^P; \quad (17)$$

$$\Delta \tau^{\text{рл}} = -0,5 \cdot m_{\text{вп}}^P; \quad (18)$$

$$\Delta V_{\text{н}}^P = 318 \cdot \Delta \tau^P, \quad (19)$$

де ΔH^P — зміна відстані фурми від рівня спокійного металу на доведенні, калібр; $\Delta \tau^{\text{рл}}$ — тривалість продувки із піднятою фурмою, хв.; $\Delta V_{\text{н}}^P$ — сумарна витрата кисню на нагрівання, м³.

Розрахунок охолоджуючого матеріалу і сумарних витрат кисню на доведення плавки за відсутності інформації про вміст вуглецю у металі на останній фазі продувки і за наявності «зразкової» продувки описується рівняннями:

$$m_{\text{вп}}^P = 0,045 \cdot \Delta t^P + 0,5 \frac{V^P - V}{v^{\text{сп}}}; \quad (20)$$

$$\Delta V^P = (V^P - V) - 100m_{\text{вп}}^P, \quad (21)$$

де ΔV^P , V — відповідно розраховані сумарні витрати кисню на плавку та поточні витрати кисню під час вимірювання температури металу за допомогою зонду, м³; $v^{\text{сп}}$ — середня інтенсивність подачі кисню у кінці продувки, м³/хв.

Положення фурми й інтенсивність подачі кисню на доведення встановлюються рівними їх значенню на останніх хвиликах «зразкової» продувки.

При $m_{\text{вп}}^P \leq 0$, ΔH^P , $\Delta \tau^P$, $\Delta V_{\text{н}}^P$ розраховуються за формулами (17)–(21).

Формули (17) – (21) можуть бути використанні для доведення (коректування) плавки за результатами, що отриманні після першої повалки.

Система прийняття рішень працює у діалоговому режимі. Спілкування дистрибуторщика з системою організовано через сукупність відеокадрів.

Відеокадр VK1 «Початкові технологічні параметри поточної плавки» (рис. 1) викликається введенням дистрибуторщиком марки сталі на поточну плавку чи з головного меню. Вся інформація поступає на відеокадр із масиву даних поточної плавки. За необхідності скоректувати деякі початкові параметри дистрибуторщик активізує курсором позицію «З корекцією даних», після чого на екрані з'являється цифрова клавіатура та виконується набір нової інформації, яка після виходу з відеокадру заноситься у масив з ознакою «Скоректовано» (підсвічується малиновим кольором).

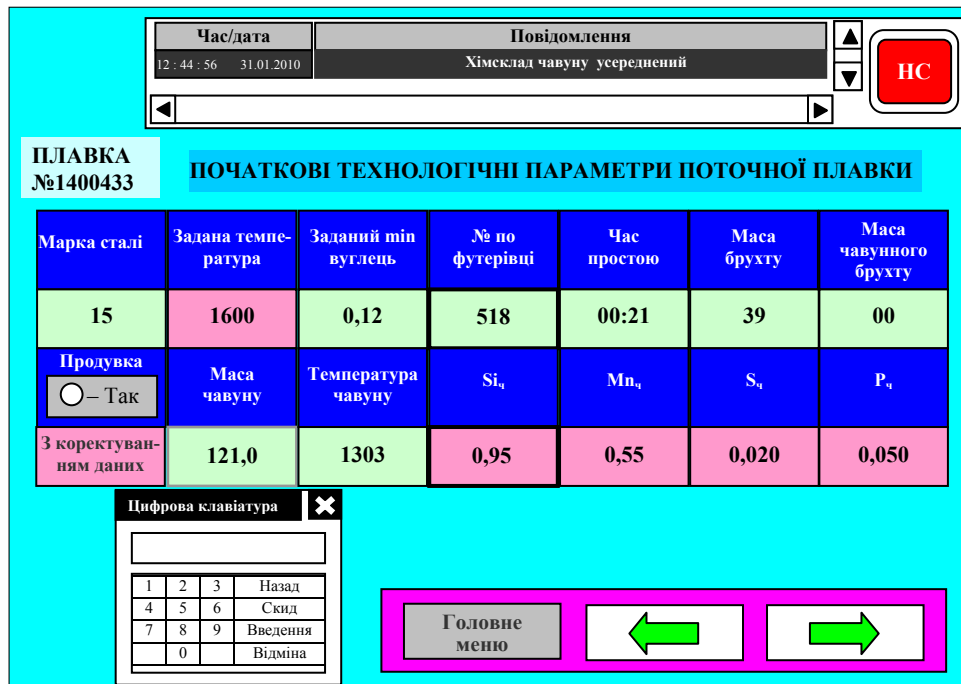


Рис. 1. Відеокадр VK1 «Початкові технологічні параметри поточної плавки»

За відсутності хімічного складу чавуну на поточну плавку видається повідомлення «Хіміклад чавуну усереднений» і підсвічується кнопка «НС».

Відеокадр VK2 «Продувка» (рис. 2) викликається з відеокадру VK1 (рис. 1) натисканням кнопки ⇒ або з головного меню. Результати розрахунку шихти виводяться на табло «РЕКОМЕНДАЦІЇ НА ПЛАВКУ» (сумарні значення параметрів) при натисканні однойменної кнопки. Одночасно заповнюються поля параметрів із масиву поточної плавки. За відсутності інформації про будь-який параметр видається повідомлення, і поле параметру підсвічується червоним кольором.

У випадку необхідності зміни значень початкових технологічних параметрів необхідно повернутися до відеокадру VK1 натиснувши кнопку «ПОВЕРНУТИСЯ». Поля параметрів сум. вапно, сум. доломіт, сум. вапняк, сум. шпат, сум. магнезит, сум. кокс, сум. окатиші заповнюються у процесі продувки по мірі завантаження відповідних матеріалів у конвертер. Заповнене поле підсвічується зеленим кольором.

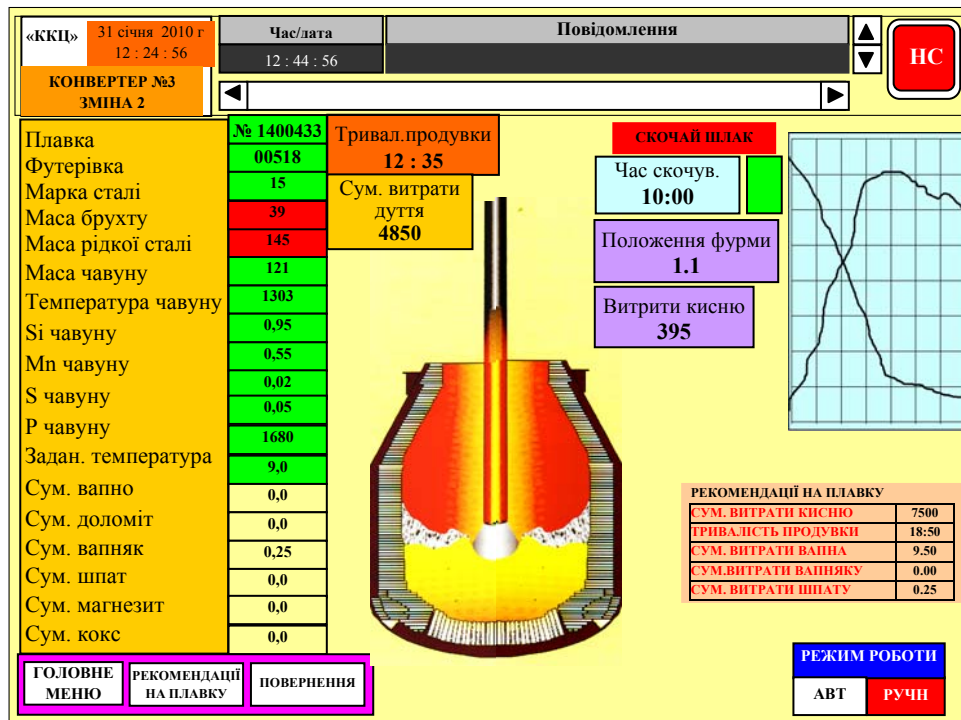


Рис. 2. Відеокадр VK2 «Продувка»

З початком продувки запускається табло «Тривалість продувки» та «Сум. витрати дуття», «Прогнозована маса рідкої сталі». Якщо плавку необхідно проводити зі скачуванням шлаку, світиться поле «СКОЧАЙ ШЛАК» із рекомендацією часу зупинки продувки для цієї операції. Також безперервно видається на відповідне поле значення поточної витрати кисню і положення фурми.

Значення швидкості зневуглицювання і вмісту вуглецю у ванні у процесі продувки виводяться у вигляді графіків.

На табло «РЕЖИМ РОБОТИ» примусово встановлюється позиція «РУЧН» (ручне керування). Для переходу на автоматичне керування натискається кнопка «АВТ».

ВИСНОВКИ

Сформульовано критерій керування процесом дуття конвертерної плавки, що дозволив поєднати три основні мети, а саме отримання заданого вмісту вуглецю, температури і вмісту сірки завдяки введенню коефіцієнтів, що визначаються масштабами змінних, які входять у критерій (є нормалізаційними — дозволяють оперувати з відносними значеннями), а також залежать від співвідношення частот коректувань через непопадання по вуглецю, температурі та сірці, відповідно (є ваговими — вказують чи буде досягнуто мети). Тобто спочатку розраховується імовірність того, що потрібно буде проводити коректуючі операції і які саме, потім визначається, яка складова критерію буде найбільш ваговою.

Наведено принципи розробки математичної моделі й розрахунку поправочних коефіцієнтів, що зв'язані з дрейфом об'єкта або відхиленням від розрахованих значень. У наслідок впливу шумів процесу і похибок у визначенні значень вихідних і керуючих параметрів кількість плавки у такті для уточнення коефіцієнтів рівнянь має бути як можна більшою. З іншого боку внаслідок дрейфу характеристик об'єкта ця кількість має бути як можна меншою. Дослідженнями, що проведені нами, встановлено, що оптимальна кількість плавки для коректування коефіцієнтів, за яких досягається мінімальна похибка системи дорівнює 15.

Розроблені моделі та алгоритми реалізовано 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».

ЛІТЕРАТУРА

1. Чернега Д.Ф., Богусевський В.С., Готвянський Ю.Я. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник. — К.: Вища школа, 2006. — 503 с.
2. Богусевський В.С., Ларионов А.А., Буга І.Д., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А. АСУТП конвертерного производства и специальной электрометаллургии. — К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1997. — 292 с.
3. Колтаков С.В., Тедер Д.И., Дубровский С.А. Управление конвертерной плавкой. и др. — М.: Металлургия, 1981. — 144 с.
4. Жидков В.Д., Соколов В.И., Кудрин Н.А., Васильев И.Я. Влияние дутьевого режима на динамику шлакообразования в конвертере // Сталь. — 1991. — № 4. — С. 25 – 29.
5. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю. Критерий управления конвертерной плавкой // Новости науки Приднепровья. — 2008. — № 3–4. — С. 104 – 106.
6. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю. Принципи створення моделі конвертерного процесу // Матеріали для роботи в екстремальних умовах: матеріали Міжнародної наук.-техн. конференції (Київ, 30–31 жовтня 2008 р.). — М-во освіти і науки, НТУУ «КПІ», 2008. — С. 140 – 143.
7. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева К.А. Математическая модель конвертерной плавки // Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник. — Дніпропетровськ: Системні технології. — 2009. — Вип.15 (35). — С. 91 – 96.
8. Богусевський В.С., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А. АСУТП производства стали в конвертерах. — К.: Техніка, 1991. — 180 с.
9. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева К.О. Система прийняття рішень при керуванні киснево-конвертерною плавкою // Нові технології. — 2009. — № 1. — С. 98 – 101.
10. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. Управление доводкой конвертерной плавки // Металл и литье Украины. — 2010. — № 3. — С. 14 – 18.
11. Богусевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева К.О., Жук С.В. Аналіз можливостей використання відомих принципів розробки моделі для управління конвертерною плавкою // Матер. XV Міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2010), м. Харків, 27–29 вересня 2010 р. — Ч. 1. — Харків, 2010. — С. 188 – 190.

Поступила 31.05.2011