

ДОВГАЛЮК Б.П., д.т.н., професор  
 БУЙНИЦЬКИЙ Є.О., студент  
 ГАЛИЦЬКИЙ Д.О., студент  
 ТАРАН М.В., студент  
 ТКАЧЕНКО О.В., студент  
 ЯЦЕНКО К.С., студент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

**Вступ.** Технологи печі завжди прагнуть підтримувати кількість дуття, паливної добавки та пари на зволоження дуття на високому рівні, забезпечуючи максимальну продуктивність печі та заощадження коксу. Тому часто значення цих параметрів значно перевищують їх оптимальні значення. Цю задачу можна розв'язати лише з використанням методів оптимізації витрати цих параметрів. Критеріями оптимальності в цих методах є продуктивність печі та сума прибутку від використання паливної добавки і пари на зволоження [1].

**Постановка задачі.** Необхідно проаналізувати становище автоматизованого керування витратою дуття, паливної добавки і пари на зволоження дуття; визначити фактори, які впливають на ефективність їх використання; розробити математичні моделі критеріїв оптимальності.

**Результати роботи.** *Критерій оптимізації витрати дуття.* Витрата дуття є основним параметром в системі контролю та керування ходом доменної печі. Технологи печі завжди прагнуть підтримувати кількість дуття на високому рівні, щоби забезпечуючи максимальну продуктивність печі. Тому часто витрата дуття значно перевищує його оптимальне значення. Внаслідок цього погіршується використання відновного газу, збільшується винос колошникового пилу та зменшується продуктивність печі. Отже цю задачу можна розв'язати лише з використанням методу оптимізації витрати дуття. Критерієм оптимальності в цьому методі є продуктивність печі, яка повинна підтримуватися на максимально можливому рівні. Максимально можливий рівень продуктивності змінюється в часі навіть під час постійного значення витрати дуття. Тому пошук оптимальної кількості дуття проводиться постійно через кожні 5-10 хвилин.

Отже, для реалізації метода необхідно в темпі реального часу контролювати продуктивність печі. Її визначають за наступними формулами. Кількість комбінованого дуття ( $V_{\text{кд}}$ ) та вміст у ньому відновного газу ( $\delta$ ) визначають із співвідношень:

$$V_{\text{кд}} = V_{\text{д}} + V_{\text{нз}}/60, \text{ м}^3/\text{хв.}, \quad (1)$$

$$\delta = V_{\text{нз}}/60V_{\text{кд}} - \text{частка одиниці об'єму}, \quad (2)$$

де  $V_{\text{д}}$  – витрата дуття,  $\text{м}^3/\text{хв.}$ ;  $V_{\text{нз}}$  – витрата природного газу, який подається у піч,  $\text{м}^3/\text{г.}$

Окисненість шихти визначають з інформації про хімічний склад та кількість шихтових матеріалів в одній подачі

$$O_{\text{ч}} = O_{\text{ум}}/Ч, \text{ кг } O_2/\text{кг чавуну}, \quad (3)$$

де  $O_{\text{ум}}$  – кількість газифікованого кисню шихти із однієї подачі, кг;  $Ч$  – кількість чавуну, який виплавляється із шихти однієї подачі, кг. Значення  $O_{\text{ум}}$  та  $Ч$  визначають із наступних співвідношень:

$$O_{\text{ум}} = 0,222A_{\text{с}} \cdot FeO + 0,43(A_{\text{с}} \cdot Fe - 0,778A_{\text{с}} \cdot FeO) + 0,43K \cdot Ж \cdot Fe_{\text{жс}} + \\ + Ч(1,14[Si] + 0,291[Mn] + 1,291[P]) + 0,5(0,85K \cdot S_{\text{к}} Ч[S]) + 0,727И \cdot CO_{2\text{кр}} - 0,43П \cdot Fe_{\text{н}}; \quad (4)$$

$$Ч = (A_2 \cdot Fe + K \cdot Ж \cdot Fe_{жс} + Д \cdot Fe_{\delta} - П \cdot Fe_n) / Fe_{\epsilon}, \quad (5)$$

де  $A_2$  – маса рудної частини шихти у подачі, кг;  $K$  – маса коксу у подачі, кг;  $П$  – винесення колошникового пилу, кг/подачу;  $И$  – маса вапняку у подачі, кг;  $Д$  – маса металобрухту у подачі, кг;  $Ж$  – вміст золи у коксі, частка одиниці маси;  $Fe$ ,  $FeO$  – вміст заліза та його оксиду у рудній частині шихти, частка одиниці маси;  $Fe_{\epsilon}$ ,  $Fe_{\delta}$ ,  $Fe_n$ ,  $Fe_{жс}$  – вміст заліза відповідно у чавуні, металобрухті, колошниковому пилу та у золі коксу, частка одиниці маси;  $CO_{2кр}$  – вміст вуглекислоти у вапняку, частка одиниці маси;  $[Si]$ ,  $[S]$ ,  $[Mn]$ ,  $[P]$  – вміст у чавуні відповідно кремнію, сірки, марганцю та фосфору, частка одиниці маси;  $S_{\kappa}$  – вміст сірки у коксі, частка одиниці маси; 0,222 – частка кисню у  $FeO$ ; 0,778 – частка заліза у  $FeO$ ; 0,727 – частка кисню у  $CO_2$ ; 0,43 – відношення маси кисню до маси заліза у  $Fe_2O_3$ ; 1,14 – відношення маси кисню до маси кремнію у  $SiO_2$ ; 0,291 – відношення маси кисню до маси марганцю у  $MnO$ ; 1,291 – відношення маси кисню до маси фосфору у  $P_2O_5$ ; 0,85 – кількість сірки коксу, яка переходить у шлак та чавун, частка одиниці маси; 0,5 – частка маси газифікованого кисню від маси сірки при її ошлакуванні.

Вихід сухого колошникового газу ( $V_{скз}$ ) з доменних печей в більшості випадків не контролюється. Його визначають за витратою комбінованого дуття, вмісту азоту у колошниковому газі  $N_2$

$$V_{скз} = \frac{100 \times V_{кд}}{\alpha \times N_2}, \text{ м}^3/\text{хв.} \quad (6)$$

Газифікований кисень шихти у колошниковому газі визначають з інформації про склад та кількість колошникового газу ( $\text{м}^3/\text{хв.}$ ):

$$O_{ш} = 0,01[0,5(CO_2 + \Delta H_2) + 0,5(CO + CO_2) - \beta \cdot N_2]V_{скз} \quad (7)$$

де  $\Delta H_2$  – кількість водню, яка перейшла у воду в зоні непрямого відновлення,  $\text{м}^3/100\text{м}^3\text{скз}$ ;  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  – складові колошникового газу, %;  $\alpha = 1/N_{\delta}$  – об'ємне відношення дуття до азоту у дутті;  $\beta = O_{\delta}/N_{\delta}$  – об'ємне відношення кисню дуття до азоту у дутті.

Значення продуктивності печі контролюють за інформацією про кількість газифікованого кисню шихти та окисненість шихти:

$$P_m = \frac{O_{ш}}{O_{\epsilon}} \times \frac{32}{22,4} = 1,43 \frac{O_{ш}}{O_{\epsilon}}, \text{ кг/хв.} \quad (8)$$

При збільшенні кількості дуття продуктивність печі зростає до визначеної межі, а потім починає зменшуватися. Зменшення продуктивності печі під час збільшення витрати дуття свідчить про те, що кількість дуття перевищує оптимальний рівень і знаходиться в області „передування”. У цій області погіршується контакт між газовим потоком і шихтою, утворюються канали, можливі застої, зависання та обриви шихти, погіршується використання відновного газу, збільшується винесення колошникового пилу, зменшується кількість кисню шихти у колошниковому газі, зростає питома витрата коксу. Управління ходом печі полягає у підтримуванні витрати дуття на оптимальному рівні, при якому продуктивність печі дорівнює максимально можливому значенню, а частинна похідна  $\partial P_m / \partial V_{\delta}$  прагне до нуля. Зміна умов роботи печі спричиняє безперервний пошук оптимального рівня витрати дуття. При нормальному ході печі через 5-10 хвилин кроками по 20-50  $\text{м}^3/\text{хв.}$  збільшують витрату дуття, вираховують приріст продуктивності  $\Delta P_m$ . Витрату дуття збільшують, якщо  $\Delta P_m / \Delta V_{\delta} > 0$ . Якщо при відповідному кроці збільшення витрати дуття продуктивність печі не зростає ( $\Delta P_m / \Delta V_{\delta} < 0$ ), то кількість дуття переви-

ще оптимальний рівень. В таких випадках пошук оптимального значення витрати дуття здійснюють зменшенням його витрати кроками по 20-50 м<sup>3</sup>/хв. через 5-10 хв.

*Критерій оптимізації витрати паливних добавок.* Одним із основних показників ефективності використання паливної добавки є коефіцієнт заміни коксу добавкою. Якщо паливною добавкою є природний газ, то значення коефіцієнта заміни визначають за формулою

$$K_3 = \frac{g + 10802\mu\eta_{H_2} + 12648\gamma\eta_{CO}}{1.8667C_k(5250 + 12648\eta_{CO})}, \text{ кг/м}^3, \quad (9)$$

де  $C_k$  – вміст вуглецю у коксі, частка одиниці маси;  $g$  – теплота згоряння відновного газу у горні печі,  $\text{кДж/м}^3$ , визначається із виразу [2]:

$$g = 1658CH_4 + 6050C_2H_6 + 10115C_3H_8 + 13796C_4H_{10} + 18053C_5H_{12} - 12648CO_2 - 10802H_2O, \quad (10)$$

де  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ , тощо – вміст відповідних компонентів природного газу, частка одиниці об'єму; 1658, 6050, тощо – теплоти згоряння (або розкладу) в горні печі відповідних компонентів природного газу,  $\text{кДж/м}^3$ .

Якщо в якості паливної добавки використовують тверде чи рідке паливо, то коефіцієнт заміни ( $\text{кг/кг}$ ) можна визначати за формулою

$$K_3 = \frac{g_{m(p)} + 23605C^p \cdot \eta_{CO} + 121000H^p \cdot \eta_{H_2} + 13400W^p \cdot \eta_{H_2}}{1.8667C_k(5250 + 12648 \cdot \eta_{CO})}, \text{ кг/кг}; \quad (11)$$

де  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $W^p$  – вміст в твердому чи рідкому паливі відповідно вуглецю, водню та води,  $\text{кг/кг}$ ; 23605 – тепловий ефект утворення  $CO_2$  із  $CO$ ,  $\text{кДж/кг}$   $C$ ; 121000 – тепловий ефект утворення  $H_2O$ ,  $\text{кДж/кг}$  водню; 13400 – тепловий ефект утворення  $H_2O$ ,  $\text{кДж/кг}$   $H_2O$ ;  $g_{m(p)}$  – теплота згоряння твердого чи рідкого палива в горні печі  $\text{кДж/кг}$ , визначається з виразу [2]

$$g_{m(p)} = Q_H^p - 121000H^p - 121400S^p - 13400W^p - 23605C^p, \quad (12)$$

де  $Q_H^p$  – повна теплота згоряння твердого чи рідкого палива,  $\text{кДж/кг}$ ;  $S^p$  – вміст сірки у твердому чи рідкому паливі,  $\text{кг/кг}$ .

Наступним показником ефективності паливної добавки є кількість заміненого коксу

$$\mathcal{E}_k = K_3 V_{nd}, \text{ кг/г}, \quad (13)$$

де  $V_{nd}$  – кількість паливної добавки, яка вдувається у піч,  $\text{кг/г}$ .

Критерієм оптимальності витрати паливної добавки є сума прибутку від використання добавки. Розроблений показник ПО відповідає цим вимогам і є критерієм оптимальності:

$$ПО = \mathcal{E}_k C_k - V_{nd} C_{nd} - V_o C_o + (P_\phi - P_3) E, \text{ грн./г}, \quad (14)$$

де  $C_k$ ,  $C_{nd}$ ,  $V_o$  – ціна коксу, паливної добавки та технологічного кисню;  $E$  – умовно постійні витрати на чавун;  $P_\phi$ ,  $P_3$  – фактична і задана продуктивність печі. Між показником ПО та кількістю паливної добавки існує екстремальна залежність, яка є основою створених алгоритмів функціонування автоматизованої системи керування (АСК) витратою природного газу або пиловугільного палива.

АСК функціонує за наступним алгоритмом [1]. З усередненої інформації за годину про витрату паливної добавки  $V_{nd}$ , склад та кількість колошникового газу розраховують: коефіцієнт заміни коксу паливною добавкою; заощаджену кількість коксу від використання паливної добавки; суму заощаджень ( $ПО_{nd}$ ) від зміни продуктивності

печі та економії коксу з урахуванням вартості добавки. Керування витратою паливної добавки полягає у підтримуванні її витрати на оптимальному рівні, який відповідає максимально можливому значенню  $PO_{nd}$ , а частинна похідна  $\partial PO_{nd} / \partial V_{nd}$  прагне до нуля. Пошук оптимальної кількості паливної добавки здійснюють зміною її витрати щогодини на  $\pm 5-10\%$  від попереднього значення. При цьому вираховують приріст витрати добавки  $\Delta V_{nd}$ , суми заощаджень від її використання  $\Delta PO_{nd}$ , продуктивності печі  $\Delta P_m$ , перепадів тиску  $\Delta P_n$ ,  $\Delta P_e$  та  $\Delta P_\Sigma$  та визначають частинні похідні:  $\Delta PO_{nd} / \Delta V_{nd}$ ;  $\Delta P_m / \Delta V_{nd}$ . Витрату добавки збільшують, якщо  $\Delta PO_{nd} / \Delta V_{nd} > 0$ ;  $\Delta P_m / \Delta V_{nd} \geq 0$ .

Кількість заміненого паливною добавкою коксу ( $\mathcal{E}_k$ ) компенсують зміною його маси у подачі з урахуванням прогнозних значень хімічного складу чавуну і шлаку та їх температури. Теоретичну температуру горіння підтримують у заданих границях зміною витрати технологічного кисню [1].

*Критерій оптимізації витрати пари на зволоження дуття.* Можливий вплив вологості дуття на тепловий стан та продуктивність доменної печі. При зміні вологості дуття ( $\Delta \lambda$ ) у горні печі витрачається тепло на її розкладання ( $\kappa \text{Дж/м}^3$  комбінованого дуття)

$$\Delta q_1 = -10802 \cdot 0,001244 \Delta \lambda = -13,44 \Delta \lambda, \quad (15)$$

а в зоні непрямого відновлення виділяється тепло від утворення  $H_2O$

$$\Delta q_2 = 13,44 \Delta \lambda \cdot \Delta \eta_{H_2O}. \quad (16)$$

Сумарна зміна приходу тепла

$$\Delta q_{H_2O} = q_1 + q_2 = -13,44 \Delta \lambda (1 - \eta_{H_2O}). \quad (17)$$

Якщо при зміні вологості дуття змінюється ступінь використання відновного газу, то це викличе додатковий вплив на тепловий стан печі. За рахунок покращення ступеня використання водню ( $\Delta \eta_{H_2}$ ) та оксиду вуглецю ( $\Delta \eta_{CO}$ ) буде додатковий прихід тепла ( $\kappa \text{Дж/м}^3$  комбінованого дуття)

$$\Delta q_{H_2} = 10802 \Delta \eta_{H_2} (\Sigma H_2 - 0,001244 \Delta \lambda); \quad (18)$$

$$\Delta q_{CO} = 12648 \Delta \eta_{CO} \cdot CO_2. \quad (19)$$

До того ж, вологість дуття, розкладаючись у горні на водень та кисень, викликає відповідну зміну інтенсивності горіння вуглецю на фурмах ( $\kappa \text{г/м}^3$  комбінованого дуття)

$$\Delta C_{чф} = 12/22,4 \cdot 0,001244 \Delta \lambda = 0,0006642 \Delta \lambda, \quad (20)$$

чи інтенсивності горіння коксу

$$\Delta K_i = 0,0006642 \cdot \Delta \lambda \cdot V_{\partial} / C_k, \kappa \text{г/хв}. \quad (21)$$

Зміни приходу тепла та інтенсивності горіння коксу можна виразити через масу коксу та продуктивність печі. Так зміна ступеня використання водню еквівалентна зміні витрати коксу на ( $\kappa \text{г/хв.}$ )

$$\Delta K_H = 10802 \Delta \eta_{H_2} (\Sigma H_2 - 0,001244 \Delta \lambda) V_{к\partial} / q_k, \quad (22)$$

де  $q_k$  – теплота згоряння  $\kappa \text{г}$  коксу у печі  $\kappa \text{Дж/кг}$ ,

$$q_k = 1,8667 C_k (5250 + 12648 \eta_{CO}). \quad (23)$$

Зміна ступеня використання оксиду вуглецю еквівалентна зміні маси коксу на ( $\kappa \text{г/хв.}$ )

$$\Delta K_{CO} = 12648 \Delta \eta_{CO} \cdot CO_2 \cdot V_{к\partial} / q_k. \quad (24)$$

Потрібна маса коксу на компенсацію тепла, яке витрачається на розкладання вологості дуття у горні ( $\kappa \text{г/хв.}$ ),

$$\Delta K_n = -13,44(1 - \eta_{n2}) \cdot V_o / q_k \cdot \quad (25)$$

Сумарна економія (знак "+") чи перевитрата (знак "-") маси коксу при зміні вологості дуття

$$\Delta K_\Sigma = \Delta K_n + \Delta K_{co} + \Delta K_n \cdot \quad (26)$$

Приріст продуктивності печі від зміни вологості дуття

$$\Delta P_\lambda = 0,0006642 \Delta \lambda \cdot V_o / (C_k \cdot k), \text{ кг/хв.}, \quad (27)$$

де  $k$  – середньодобова питома витрата коксу,  $\text{кг/т чавуну}$ .

Комплексним показником ефективності зміни вологості дуття може бути економія коштів від використання пари на зволоження ( $\text{грн./г}$ )

$$\Delta PO_\lambda = 60(\Delta K_\Sigma \cdot C_k + \Delta P_\lambda \cdot E) / 1000 - \Delta V_n \cdot C_n, \quad (28)$$

де  $C_n$  – ціна пари,  $\text{грн./т}$ ;  $\Delta V_n$  – зміна витрати пари на зволоження дуття,  $\text{т/г}$ .

В умовах роботи доменної печі №8 ДМК провели дослідження показників ефективності зволоження дуття. На печі виплавлявся переробний чавун. В цей час функціонувала АСУ ТП з використанням УВК М-6000, за допомогою якої зібрано інформацію про параметри та показники технологічного процесу, за якими визначено показники ефективності зволоження дуття.

Дослідження показали, що у більшості випадків збільшення вологості дуття сприяло покращенню використання відновного газу та підвищенню продуктивності печі, внаслідок чого піч розігрівалася. Спостерігалися також випадки, коли збільшення вологості не впливало на відновну роботу газового потоку чи погіршувало її.

Функціонування системи оптимізації витрати пари на зволоження дуття починається з аналізу ступеня використання водню в печі ( $\eta_{n2}$ ), теоретичної температури горіння ( $t_m$ ), вологості дуття ( $\lambda$ ), температури чавуну ( $t_u$ ) або вмісту кремнію ( $Si$ ) в чавуні останнього випуску. Якщо  $\eta_{n2} < 40\%$ , а  $t_m > 2000^\circ\text{C}$ ,  $\lambda < 30 \text{ г/м}^3$ ,  $t_u \geq t_{u3}$  чи  $Si \geq Si_3$ , то підвищують витрату пари на  $0,5-1,5 \text{ м/г}$  ( $t_{u3}$ ,  $Si_3$  – задані середні значення температури чавуну чи вмісту у ньому кремнію).

Якщо  $t_m < 2000^\circ\text{C}$ ,  $t_u < t_{u3}$ ,  $Si < Si_3$ ,  $\lambda > 20 \text{ г/м}^3$ , то витрату пари зменшують на  $0,5-1,5 \text{ м/г}$ .

Через годину після зміни витрати пари аналізують усереднені за годину прирощування

$$\Delta V_n = V_n(t) - V_n(t-1). \quad (29)$$

Якщо  $|\Delta V_n| > 0,3 \text{ м/г}$ , то обчислюють прирощування:

$$\Delta \lambda = \lambda(t) - \lambda(t-1); \quad (30)$$

$$\Delta \eta_{n2} = \eta_{n2}(t) - \eta_{n2}(t-1); \quad (31)$$

$$\Delta \eta_{co} = \eta_{co}(t) - \eta_{co}(t-1), \quad (32)$$

а також показники ефективності зміни вологості дуття  $\Delta K_n$ ,  $\Delta K_{co}$ ,  $\Delta K_n$ ,  $\Delta K_\Sigma$ ,  $\Delta P_\lambda$ ,  $\Delta PO_\lambda$  та рекомендацію на зміну маси коксу у подачі

$$\Delta K_\lambda = -60 \Delta K_\Sigma / N, \text{ кг / подачу.} \quad (33)$$

Аналізують відношення  $\Delta PO_\lambda / \Delta \lambda$  та значення  $\Delta K_\lambda$ . Якщо  $\Delta PO_\lambda / \Delta \lambda > 0$ , а  $\Delta K_\lambda < -30 \text{ кг/подачу}$ , то витрату пари ще збільшують на  $0,5-1,5 \text{ м/г}$ . Обмеженнями ви-

трати пари можуть бути: верхня задана границя вологості дуття та нижня задана границя теоретичної температури горіння (визначаються представником доменної печі).

Якщо  $\Delta PO_{\lambda} / \Delta \lambda < 0$ , а  $\Delta K_{\lambda} > 30 \text{ кг/подачу}$ , то витрату пари зменшують на 0,5-1,5 т/г. Витрату пари зменшують доти, поки  $\Delta PO_{\lambda}$  росте, а значення  $\Delta PO_{\lambda} / \Delta \lambda < 0$ . Обмеженнями зменшення витрати пари можуть бути: верхній заданий рівень теоретичної температури горіння та нижній заданий рівень витрати пари.

**Висновки.** Розроблено методи оптимізації технологічних процесів доменної плавки: витрати дуття, витрати паливних добавок, витрати пари на зволоження дуття. Критеріями оптимальності запропоновано екстремальні значення продуктивності доменної печі від зміни витрати дуття та заощадження коштів від зміни витрати паливних добавок і вологості дуття. На основі цих критеріїв планується створити автоматизовану систему оптимізації ходу доменної печі. Впровадження системи дозволить значно покращити техніко-економічні показники роботи доменної печі: зменшити питому витрату коксу, паливних добавок та пари на зволоження дуття (на 5-7%), збільшити продуктивність доменних печей (на 8-10%) та стабілізувати якість чавуну – його температуру, вміст у ньому кремнію та сірки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки / Б.П.Довгалюк. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. – 245с.
2. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / Рамм А.Н. – М.: Металлургия, 1980. – 304с.

*Надійшла до редколегії 01.10.2018.*

УДК 669.162.267.4:004.942

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.191

ДОВГАЛЮК Б.П., д.т.н., професор  
БУЙНИЦЬКИЙ Є.О., студент  
ГАЛИЦЬКИЙ Д.О., студент  
ТАРАН М.В., студент  
ТКАЧЕНКО О.В., студент  
ЯЦЕНКО К.С., студент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### КОМПЛЕКСНИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

**Вступ.** Ефективність використання пиловугільного палива (ПВП) у доменній печі обумовлюється оптимізацією технологічного процесу. Тому система оптимізації ПВП повинна складатися із підсистем: контролю достовірності інформації про технологічні параметри процесу; стабілізації основності шлаку і теоретичної температури горіння; компенсації втрат тепла і коливання процесу окиснення чавуну на фурмах; стабілізації теплового стану процесу; оптимізації витрати ПВП і продуктивності печі. Алгоритм функціонування системи включає комплекс алгоритмів функціонування цих підсистем.