

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 ΔPO_{λ} 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.

Постановка задачі. Необхідно проаналізувати становище автоматизованого керування витратою ПВП; виявити наявність математичної моделі ефективності використання ПВП; визначити фактори, які впливають на ефективність використання ПВП та можливість їх компенсації; розробити алгоритм функціонування автоматизованої системи оптимізації витрати ПВП на доменну плавку.

Результати роботи. Алгоритм функціонування системи оптимізації витрати ПВП на доменну плавку – це комплекс алгоритмів функціонування підсистем, які забезпечують оптимізацію всього технологічного процесу.

Алгоритм контролю достовірності інформації. За усередненою інформацією про технологічні параметри за годину розраховують (за моделлю) склад колошникового газу і порівнюють його з усередненими за годину показами газоаналізаторів. Якщо різниці між ними перевищують задані величини, то роблять висновок про те, що незадовільні метрологічні характеристики вимірювальних та обчислювальних каналів і починають перевірку цих каналів за такою схемою [1].

Достовірність інформації про склад колошникового газу визначають перевіркою газоаналізаторів за допомогою контрольної газової суміші.

Точність інформації про вологість дуття λ перевіряють за методикою: на період часу 5-10 хв. збільшують витрату пари V_n на $\Delta V_n = 0,5-1,0 \text{ м}^3$ і визначають прирощення вологості

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta V_n \times 10^6}{60 \times V_d}, \text{ г/м}^3; \quad (1)$$

за приладом вологості дуття $\Delta\lambda_{np}$ та їх різницю $\Delta = \Delta\lambda_{np} - \Delta\lambda$. Якщо $|\Delta| > 1.5 \text{ г/м}^3$ і $\Delta > 0$, то припускають, що завищено значення вологості дуття λ та витрати дуття або занижено значення витрати пари на зволоження. Якщо $\Delta < 0$, то, навпаки, припускають, що занижено значення λ і V_d чи завищено значення V_n . У визначеному напрямку перевіряють роботу цих приладів.

Інформацію про вихід колошникового газу $V_{скз}$ перевіряють за методикою: усереднене за годину значення $V_{скз}$, яке контролюють приладом, порівнюють з $V_{скз}^1$, що вираховують з усередненої за годину інформації про склад колошникового газу, витрату комбінованого дуття $V_{кд}$ за формулою

$$V_{скз}^1 = \frac{100 \times V_{кд}}{\alpha \times N_2}, \text{ м}^3/\text{хв}. \quad (2)$$

і визначають різницю

$$\Delta V_{скз} = V_{скз} - V_{скз}^1. \quad (3)$$

Якщо $|\Delta V_{скз}| > 10 \text{ м}^3/\text{хв}.$, і $\Delta V_{скз} > 0$, то можливі ситуації: завищено значення $V_{скз}$ і занижено витрату дуття; занижено вміст в колошниковому газі CO , CO_2 , H_2 ; занижено вміст кисню у дутті; завищено вологість дуття. Якщо $\Delta V_{скз} < 0$, то припускають, що занижено значення $V_{скз}$, завищено витрату дуття, природного газу і вміст кисню у дутті, завищено вміст в колошниковому газі CO , CO_2 , H_2 , занижено вологість дуття. У відповідності з такими прогнозами перевіряють роботу приладів.

Інші вимірювальні канали перевіряють за схемою [1].

Алгоритм стабілізації основності шлаку. З інформації про склад та кількість шихти, що завантажується у піч, вираховують кількість CaO та SiO_2 в подачі і прогнозоване значення основності шлаку B_m :

$$B_m = CaO/SiO_2. \quad (4)$$

Якщо значення B_m відрізняється від заданої основності (B_3), то визначають потрібну кількість вапняку у подачі [2].

Алгоритм стабілізації теоретичної температури горіння. За середньогодиною інформацією про параметри комбінованого дуття обчислюють значення теоретичної температури горіння [2], яке порівнюють із заданими границями $t_{m.мін} < t_m < t_{m.макс}$ °С.

Якщо $t_m > t_{m.макс}$, то визначають $\Delta t = t_m - t_{m.макс}$, а якщо $t_m < t_{m.мін}$, то визначають $\Delta t = t_m - t_{m.мін}$. За значеннями Δt вираховують рекомендації на зміну витрати технологічного кисню ΔV_o , вологості $\Delta \lambda_m$ чи температури дуття Δt_o :

$$\Delta V_o = -0,0164 \Delta t \cdot V_o, m^3/z; \quad (5)$$

$$\Delta \lambda_m = 0,157 \Delta t, z/m^3; \quad (6)$$

$$\Delta t_o = -1,29 \Delta t, ^\circ C. \quad (7)$$

Алгоритм контролю і компенсації окиснення елементів чавуну на фурмах. З усередненої інформації за 10 хв. визначають температуру фурмених вогнищ t_ϕ , теоретичну температуру горіння t_m та різницю між ними:

$$\Delta t = t_m - t_\phi. \quad (8)$$

За кожні 10 хв. визначають приріст Δt

$$\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1). \quad (9)$$

Якщо $\Delta < -30^\circ C$, то видається інформація, що збільшилось окиснення елементів чавуну на фурмах. Якщо $\Delta > 30^\circ C$, то видається інформація, що зменшилось окиснення елементів чавуну на фурмах. Визначається міра зміни окиснення заліза Δz , %:

$$\Delta z = 0,75 \Delta. \quad (10)$$

З ковзного масиву усередненої інформації за кожні 20, 30, 60 хв. тривалістю 48 годин визначають ковзні взаємно-кореляційні функції (ВКФ) залежності вмісту кремнію, сірки в чавуні та його температури від Δz . Наявність двох екстремумів ВКФ (перший – в області прогнозу за 40-120 хв. із зворотною залежністю, а другий – в області прогнозу за 400-560 хв. із прямою залежністю) буде підтверджувати коливання окиснення елементів чавуну на фурмах. Кожної години за екстремальними значеннями коефіцієнтів парної кореляції визначають ковзні рівняння регресії залежності зміни складу чавуну та його температури від Δz :

через 40-120 хв. (τ_1)

$$\Delta Si(t + \tau_1) = a + b \Delta z(t); \quad \Delta S(t + \tau_1) = a + b \Delta z(t); \quad \Delta t_u(t + \tau_1) = a + b \Delta z(t), \quad (11)$$

через 400-560 хв. (τ_2)

$$\Delta Si(t + \tau_2) = a + b \Delta z(t); \quad \Delta S(t + \tau_2) = a + b \Delta z(t); \quad \Delta t_u(t + \tau_2) = a + b \Delta z(t). \quad (12)$$

За цими рівняннями розраховують прогнозні зміни відповідних параметрів якості чавуну. Вони передаються в підсистему керування тепловим станом плавки для ком-

пенсації впливу коливання Δz .

Алгоритм керування тепловим станом процесу. Забезпечується комбінований принцип керування, тобто одночасне керування по відхиленню регульованої величини та по збуренням [2]. Із збурюючих дій визначають коливання: вмісту заліза у рудній частині шихти ΔFe , кількості вапняку $\Delta И$ та металобрухту $\Delta Д$ у подачі, вмісту вуглецю ΔC_k у коксі. Для їх компенсації розраховують рекомендації на зміну маси агломерату у подачі

$$\Delta A_{ин} = 260\Delta C_k - 400\Delta Fe - 0,33\Delta Д - \Delta И, \text{ кг/под.} \quad (13)$$

Визначають зміну приходу тепла у зону непрямого відновлення (показник ΔM_o), за якою вираховують рекомендації на зміну маси коксу ΔK_1 у подачі:

$$\Delta K_1 = \frac{-\Delta M_o \cdot Ч}{1,585(5250 + 12648\eta_{co})}. \quad (14)$$

У період між випусками чавуну із печі регульовану величину (температура чавуну t_u , вміст у ньому кремнію Si та сірки S) контролюють показниками приходу тепла T_n [2]. За інформацією за кожні 15 випусків чавуну визначають ковзні значення коефіцієнта парної кореляції між вмістом у чавуні Si , S та його температурою t_u (функція Y_j) і комплексними показниками T_n (аргументи X_i). За максимальним абсолютним значенням коефіцієнта кореляції визначали рівняння регресії

$$Y_j = a + bX_i. \quad (15)$$

За цим рівнянням за заданими значеннями функції вираховують необхідні значення комплексних показників ($X_{n,i}$). Поточне значення відповідного показника співставляють з необхідним і вираховують різницю $\Delta X_i = X_i - X_{n,i}(\Delta T_n)$, за якою визначають рекомендації на зміну вологості дуття [2]:

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta T_n \cdot P_m}{13,44V_o}. \quad (16)$$

За абсолютним значенням коефіцієнта кореляції оцінюють стан підсистеми.

Алгоритм компенсації втрат тепла з охолоджуючою водою і колошниковим газом. Втрату тепла з охолоджуючою водою визначають:

$$\text{для верхньої частини печі} \quad Q_1 = \sum_{i=1}^6 G_i \Delta t_i c_e, \text{ кДж/хв.}; \quad (17)$$

$$\text{для нижньої частини печі} \quad Q_2 = \sum_{j=1}^n G_j \Delta t_j c_e, \text{ кДж/хв.}, \quad (18)$$

де G_i – кількість води, що проходить крізь i -й холодильник верхньої частини печі, кг/хв.; G_j – кількість води, що проходить крізь j -й холодильник нижньої частини печі, кг/хв.; Δt_i – різниця температури вихідної і вхідної води i -го холодильника верхньої частини печі, °C; Δt_j – різниця температури вихідної і вхідної води j -го холодильника ниж-

ньої частини печі, $^{\circ}\text{C}$; c_v – теплоємність води, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; v – кількість холодильників верхньої частини печі; n – кількість холодильників нижньої частини печі.

Кількість тепла, що витрачається з колошниковим газом

$$Q_{кз} = V_{кз} t_{кз} c_{кз}, \text{кДж/хв.}, \quad (19)$$

де $t_{кз}$ – температура колошникового газу, $^{\circ}\text{C}$; $c_{кз}$ – теплоємність колошникового газу, $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$; $V_{кз}$ – вихід колошникового газу, $\text{м}^3/\text{хв.}$, його значення визначають:

$$V_{кз} = V_{скз} + 0,01\Delta H_2 V_{скз}, \text{м}^3/\text{хв.}, \quad (20)$$

де $0,01\Delta H_2 V_{скз}$ – кількість водяної пари в колошниковому газі, що утворилася в зоні непрямого відновлення, $\text{м}^3/\text{хв.}$; $V_{скз}$ – вихід сухого колошникового газу, $\text{м}^3/\text{хв.}$

Втрати тепла визначають на кг виплавленого чавуну ($P_m, \text{кг/хв.}$):

$$q_1 = Q_1 / P_m, \text{кДж/кг}; \quad (21)$$

$$q_2 = Q_2 / P_m, \text{кДж/кг}; \quad (22)$$

$$q_{кз} = Q_{кз} / P_m, \text{кДж/кг}. \quad (23)$$

З урахуванням коливання втрат тепла з колошниковим газом та охолоджуючою водою коригують комплексні показники для оперативного контролю теплового стану:

$$M_{кр} = M - q_1 - q_2 - q_{кз}; \quad (24)$$

$$M_{1кр} = M_1 - q_1(t - \tau) - q_2 - q_{кз}(t - \tau); \quad (25)$$

$$T_{нкр} = T_n - q_2. \quad (26)$$

За цими показниками прогнозують тепловий стан плавки і якість чавуну.

Алгоритм оптимізації витрати дуття. Алгоритм управління ходом печі полягає у підтримуванні витрати дуття на оптимальному рівні, при якому продуктивність печі дорівнює максимально можливому значенню, а частинна похідна $\partial P_m / \partial V_d$ прагне до нуля. Зміна умов роботи печі спричиняє безперервний пошук оптимального рівня витрати дуття.

Алгоритм полягає в наступному. При нормальному ході печі через 5-10 хв. кроками по 20-50 $\text{м}^3/\text{хв.}$ збільшують витрату дуття і вираховують приріст продуктивності ΔP_m , коефіцієнта заміни коксу паливною добавкою ΔK_3 , ступеня використання водню $\Delta \eta_{H_2}$ і оксиду вуглецю $\Delta \eta_{CO}$ та визначають частинні похідні: $\partial P_m / \partial V_d$; $\partial K_3 / \partial V_d$; $\partial \eta_{H_2} / \partial V_d$; $\partial \eta_{CO} / \partial V_d$. Витрату дуття збільшують, якщо $\partial P_m / \partial V_d > 0$; $\partial K_3 / \partial V_d \geq 0$; $\partial \eta_{H_2} / \partial V_d \geq 0$; $\partial \eta_{CO} / \partial V_d \geq 0$. Якщо при відповідному кроці збільшення витрати дуття продуктивність печі не зростає, а ступінь використання відновного газу погіршується і зменшується коефіцієнт заміни коксу паливною добавкою, то кількість дуття перевищує оптимальний рівень. В таких випадках пошук оптимального значення витрати дуття здійснюють зменшенням його витрати кроками по 20-50 $\text{м}^3/\text{хв.}$ через 5-10 хв. Оптимальна кількість дуття досягається тоді, коли частинна похідна $\partial P_m / \partial V_d$ дорівнює нулю.

Алгоритм оптимізації витрати ПВП. За інформацією про витрату та склад комбінованого дуття, склад колошникового газу визначають показники ефективності ПВП:

коефіцієнт заміни коксу

$$K_3 = \frac{g_{m(p)} + 23605C^p \cdot \eta_{co} + 121000H^p \cdot \eta_{H_2} + 13400W^p \cdot \eta_{H_2}}{1,8667c_k (5250 + 12648 \cdot \eta_{co})}, \text{ кг/кг}; \quad (27)$$

кількість заміненого коксу пиловугільним паливом

$$E_{к.пеп} = K_3 V_{пеп}, \text{ кг/хв.} \quad (28)$$

Ефективність ПВП оцінюють сумою прибутку:

$$ПО = E_{к.пеп} C_k - V_{пеп} C_{пеп} - V_o C_o + (P_\phi - P_3) E, \text{ грн./г}, \quad (29)$$

де C_k , $C_{пеп}$, C_o – ціна коксу, ПВП та технологічного кисню; E – умовно постійні витрати на чавун; P_ϕ , P_3 – фактична і задана продуктивність печі.

При рівному ході печі, достовірній інформації про параметри процесу плавки і задовільному функціонуванні усіх підсистем (стабілізації основності шлаку і теоретичної температури горіння; компенсації втрат тепла і коливання процесу окиснення чавуну на фурмах; стабілізації теплового стану процесу плавки і якості чавуну; оптимізації витрати дуття) збільшують витрату ПВП на 5-10 г/м³. Находять оптимальну кількість ПВП, яка відповідає максимально можливому значенню показника ПО. Для цього порівнюють значення ПО з попереднім, що було до збільшення ПВП, і визначають різницю

$$\Delta ПО = ПО(t) - ПО(t-1). \quad (30)$$

Якщо $\Delta ПО > 0$, то витрату ПВП збільшують ще на 5-10 г/м³. Якщо $\Delta ПО < 0$, то витрату ПВП зменшують на 5-10 г/м³. Збільшення чи зменшення витрати ПВП проводять доти, поки ПО зростає. Коли при черговій зміні витрати ПВП $|\Delta ПО| \leq \Delta_1$, то ця витрата відповідає оптимуму (Δ_1 – зона нечутливості, можна прийняти ± 5 грн./г). Визначений оптимальний рівень витрати ПВП підтримують доти, доки $|\Delta ПО| \leq \Delta_1$. Якщо $|\Delta ПО| > \Delta_1$, починають пошук нового оптимального рівня. При цьому, якщо $\Delta ПО > 0$, то пошук ведуть збільшенням витрати ПВП, а якщо $\Delta ПО < 0$, то – зменшенням. Коливання значення $E_{к.пеп}$ компенсують зміною маси коксу у подачі.

Висновки. Розроблено комплексний алгоритм функціонування автоматизованої системи оптимізації витрати ПВП на доменну плавку. Він включає алгоритми: контролю достовірності інформації; стабілізації основності шлаку; стабілізації теоретичної температури горіння; контролю і компенсації окиснення елементів чавуну на фурмах; керування тепловим станом плавки; компенсації втрат тепла з охолоджуючою водою і колошниковим газом; оптимізації витрати дуття; оптимізації витрати ПВП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б.П. Інформаційне забезпечення АСУ ТП доменної печі / Б.П.Довгалюк // Вісник Технологічного університету Поділля: наук. журнал. – Хмельницький. – 2002. – Том 1. – С.91-95.
2. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки / Б.П.Довгалюк. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. – 245с.

Надійшла до редколегії 01.10.2018.