

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, К.О. Сергєєва

**КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ
КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ****Вступ**

Фізико-хімічні процеси, що протікають у конвертерній ванні, значною мірою визначає температурний режим процесу. Особливо важливою проблема контролю температури стає у зв'язку з оснащенням конвертерних цехів установками безперервного розливу сталі. При цьому необхідно забезпечити кінцеву температуру металу в конвертері на рівні 1680–1710 °С, тобто на 80–100 °С вищою, ніж при розливі у виливниці. Одночасно високі вимоги до контролю температурного режиму зв'язані з підвищенням використанням металевих брухту. Плавки продуваються до наднизького вмісту вуглецю (0,04–0,05 %) з метою повного використання хімічної теплоти чавуну з наступним науглецюванням металу, що зливається.

Для безперервного контролю температури металу в процесі продувки конвертера відома низка контактних і безконтактних методів. Але складна реалізація контактних засобів і низька стійкість захисних чохлах термопар заважає широкому впровадженню методів у промислових умовах [1].

У праці [2] проведено дослідження способу безперервного вимірювання температури металу в конвертері по ходу продувки оптоволоконним датчиком. Отримано задовільні результати на конвертерах із донною продувкою. Але ошлакування фурм призводить до перекриття візування датчика і перериває його показання. Для усунення заметалювання візирної труби її безперервно продувають сумішшю окиснюючого (повітря) і нейтрального (аргон) газу [3]. Залежно від складу суміші вихід каналу візування або заростає настилями, що утворюються (при зменшенні), або розгоряється (при збільшенні частки окиснювача). Підтриманням оптимального отвору візування можна отримати задовільні результати вимірювання температури.

Відомі методи безперервного вимірювання температури конвертерної ванни досить трудомісткі, тому їх доцільно використовувати тіль-

ки при дослідженні процесу для відпрацювання нової технології.

Серед непрямих методів контролю температури найбільш поширені методи теплового балансу [4, 5]. Але ці методи не дають задовільних результатів, якщо змінюється ступінь допалювання СО до СО₂ у ванні конвертера, або вміст MnO і FeO у шлаку.

Таким чином, використання відомих методів не дає можливості контролювати температуру з необхідною для технологічного процесу точністю.

Постановка задачі

Метою досліджень у даній статті є створення моделі і засобів контролю температурного режиму ванни конвертера на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної і надійної інформації про хід процесу і реалізації згаданого контролю в АСКТП конвертерної плавки.

Непрямі методи контролю

Важливим параметром конвертерної плавки є температурний режим продувки. На рис. 1 наведено методи контролю цього параметра.

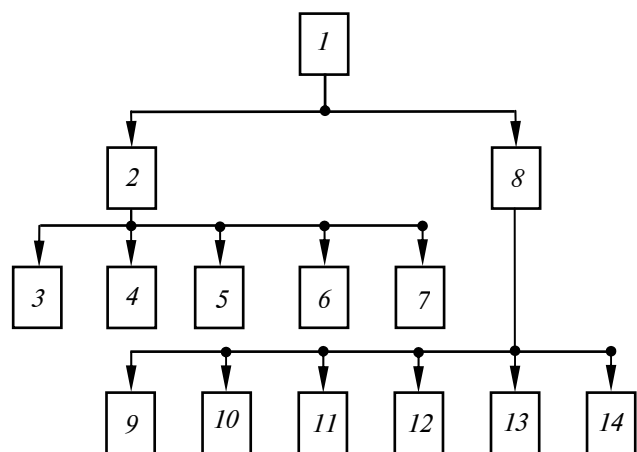


Рис. 1. Методи контролю температурного режиму конвертерної ванни (1); 2 – прямі: термоелектричними пірометрами занурення на повалці (3), бомбовою термопарою (4), безперервно по ходу продувки (5), занурювальним зондом (6) і безконтактним пірометром випромінювання (7); 8 – непрямі: за інформацією про температурне поле у футерівці конвертера на основі температури (9) і електричної провідності (10), температури факела (11) і газу, що відходить (12), перепаду температури води на охолоджувальних елементах (13) і температурного подовження екрана охолоджувача конвертерних газів (14)

При продувці рідкого чавуну киснем утворюється значний надлишок теплоти при окисненні домішок. Ванну охолоджують введенням сталю брукхту і вапняку (або залізної руди), що поглинають теплоту при плавленні і розкладанні. У зв'язку з тим, що неможливо здійснити точне дозування брукхту, в завалку його дають дещо менше, ніж необхідно для отримання заданої температури металу. Для точної компенсації надлишку теплоти протягом продувки додають вапняк. Таким чином, температура ванни визначається фізичною теплою вихідних матеріалів, тепловиділенням при окисненні домішок чавуну, витратою теплоти на нагрів, плавлення і розкладання охолоджуючих і шлакоутворюючих матеріалів, а також теплотратами.

Результати досліджень параметрів шихти, дуття і газу, що відходить, використано нами для розрахунку поточних значень температури ванни по ходу продувки

$$t = \Delta t + 0,78t_{\text{ч}} - 11,5 G_{\text{вп пр}} + \sum_{i=1}^6 F_i, \quad (1)$$

де $t_{\text{ч}}$ – температура чавуну, °С; Δt – поправка, що визначається за результатами попередньої плавки, °С; F_i – функція від деяких параметрів, °С; $G_{\text{вп пр}}$ – приведена маса вапняку на плавку, т:

$$G_{\text{вп пр}} = \sum_{j=1}^k G_{\text{вп}j} + 0,4 \sum_{j=1}^p G_{\text{в}j}; \quad (2)$$

тут $G_{\text{вп}j}$, $G_{\text{в}j}$ – маса вапняку і вапна в j -у добавку, т; k , p – кількість добавок вапняку і вапна, відповідно.

Розглянемо окремі складові рівняння (1). Поправка Δt визначається за виразом

$$\Delta t = 3\sqrt{t_{\text{ф}(n-1)} - t_{(n-1)}} \text{sign}(t_{\text{ф}(n-1)} - t_{(n-1)}), \quad (3)$$

де $t_{\text{ф}(n-1)}$, $t_{(n-1)}$ – відповідно фактичне і розрахункове значення температури ванни попередньої плавки, °С.

Функція F_1 , що визначається процесом теплової обробки брукхту в конвертерній ванні в загальному вигляді записується формулою

$$F_1 = -\Delta t_{\text{б}}(\psi) - \int_0^{3\Delta\tau(\psi)} (\partial t / \partial \tau)_{\text{б}}(\psi) d\tau, \quad (4)$$

де $\Delta t_{\text{б}}(\psi)$ – пониження температури ванни внаслідок розплавлення брукхту визначеного виду ψ в момент заливки чавуну, °С; $\Delta t(\psi)$ – стала часу перехідного процесу проплавлення брукхту виду ψ , хв; $(\partial t / \partial \tau)_{\text{б}}(\psi)$ – швидкість зміни температури ванни, що відбувається через проплавлення сталю брукхту даного виду по ходу продувки, °С/хв; τ – час від початку продувки, хв.

Виходячи із співвідношень матеріально-теплового балансу, записуємо функцію F_1 у такому вигляді:

$$F_1 = (-\omega l / Q_{\text{б}}) \{ Q_{\text{б}} \beta(\psi) + 60 q_{\text{б}} |_{\tau=0(\psi)} \int_0^{3\Delta\tau(\psi)} \exp[-\tau / \Delta\tau(\psi)] d\tau \}, \quad (5)$$

де ω – питомий охолоджуючий ефект брукхту, °С/%; l – витрата брукхту відносно маси металевої шихти, %; $Q_{\text{б}}$ – охолоджуючий ефект брукхту, Дж/т; $\beta(\psi)$ – масова частка брукхту визначеного виду, що розплавився при заливці чавуну в конвертер; $q_{\text{б}} |_{\tau=0(\psi)}$ – питома потужність, що витрачена на процес теплової обробки брукхту даного виду в момент $\tau = 0$, Вт/т.

Функція, що залежить від відстані фурменного кінцевика до рівня спокійного металу, має вигляд

$$F_2 = -8,47 \int_{(\tau)} \Delta H \sigma(\Delta H) \sigma(4,5 - \Delta H) d\tau - \int_{(\tau)} (25,7 \Delta H - 77) \sigma(\Delta H - 4,5) \sigma(7,5 - \Delta H) d\tau - \int_{(\tau)} (2,82 \Delta H + 94,4) \sigma(\Delta H - 7,5) \sigma(21 - \Delta H) d\tau, \quad (6)$$

де ΔH – відхилення відстані фурменного кінцевика, калібр:

$$\Delta H = H - \bar{H}_{(n-1)}; \quad (7)$$

тут $\bar{H}_{(n-1)}$ – середня відстань фурменного кінцевика над рівнем спокійного металу за період від 13-ї до 17-ї хвилини продувки попередньої плавки, калібр; σ – сігма-функція, що набуває значень 1 або 0:

$$\bar{H}_{(n-1)} = [1/(\tau_2 - \tau_1)] \int_{\tau_1=13}^{\tau_2=17} H_{(n-1)} d\tau, \quad (8)$$

де $H_{(n-1)}$ – поточна висота фурми в попередній плавці, калібр.

Функція F_3 , що залежить від витрати дуття, і F_4 , що визначається об'ємом дуття, мають вигляд

$$F_3 = - \int_{(\tau)} (231 - 0,77v) \sigma(300 - v) \sigma(v - 240) d\tau, \quad (9)$$

$$F_4 = 0,0562 \int_{(\tau)} v d\tau. \quad (10)$$

Функція F_5 , що залежить від вихідних динамічних параметрів газу, який відходить, визначається у вигляді

$$F_5 = \int_{(\tau)} (0,485 \Delta t_{\phi} + 0,785 \Delta l + 0,013 t_{\Gamma}) d\tau, \quad (11)$$

де Δt_{ϕ} – різниця температури води на вході і виході із фурми, °C; Δl – температурне лінійне подовження екранних труб під'ємного газоходу, мм; t_{Γ} – температура газу в перехідному газоході, °C.

Функція F_6 , що визначається тепловтратами на нагрів конвертера, має такий вигляд:

$$F_6 = -1,25 \cdot 10^{-5} (Q_{п.г} + Q_{п.вт}), \quad (12)$$

де $Q_{п.г}$, $Q_{п.вт}$ – питомі втрати теплоти відповідно випромінюванням через горловину і на прогрів футерівки в ході її експлуатації, Дж/100 кг чавуну.

Алгоритм розрахунку поточної температури ванни пройшов промислові випробування на конвертерах Криворізького і Маріупольського ім. Ілліча металургійних комбінатів. Ці випробування показали добрий збіг з експериментальними даними, що забезпечує контроль температури із середньоквадратичним відхиленням, який не перевищує 1 %.

Прямі методи контролю

Нами досліджено можливість безперервного контролю температури ванни з використанням інформації про швидкість поширення ультразвуку в металевому розплаві, яка в рідині (м/с) становить

$$w = \sqrt{E/\rho}, \quad (13)$$

де E – модуль об'ємної пружності рідини, кг/(м·с²); ρ – густина рідини, кг/м³.

Відомо також, що із зміною температури змінюється швидкість поширення ультразвукових хвиль у рідині відповідно до температурного коефіцієнта швидкості:

$$w = \sqrt{E/\rho} + f(\gamma, t), \quad (14)$$

де γ – температурний коефіцієнт швидкості звуку, м/(с·°C).

Для спрощення рівняння зв'язок між зміною температури і швидкістю поширення ультразвукових хвиль для діапазону зміни температур у сталеплавильній ванні (1200–1700 °C) подамо в лінійному вигляді. Оскільки шукане значення температурного коефіцієнта ультразвуку належить до рідкого стану металу і вимірювання швидкості ультразвуку від початкового значення проходить у діапазоні температур для рідкої фази, запишемо вираз (2) у такому вигляді:

$$w = \sqrt{E/\rho} + \gamma(t - t_{кр}), \quad (15)$$

де $t_{кр}$ – температура кристалізації рідини, °C.

Модуль об'ємної пружності, який обернено пропорційний коефіцієнту стискання рідкого металу, в процесі продувки залежить від кількості газових пухирів в об'ємі металу, тобто від швидкості зневуглецювання [6], і може бути записаний у вигляді

$$E = 1/\zeta = 1/(b_0 + b_1 v_C^{0,7}), \quad (16)$$

де ζ – коефіцієнт стискання рідини, м·с²/кг.

Температуру кристалізації зобразимо за діаграмою залізо–вуглець у вигляді

$$t_{кр} = b_2 - b_3 C, \quad (17)$$

де $b_0 - b_3$ – коефіцієнти.

Коефіцієнти b_2 і b_3 вибрані для ділянки з масовою часткою вуглецю менше 0,3. Деяке завищення температури кристалізації для високих вмістів вуглецю (2 % і більше) виправдано тим, що в цьому випадку у ванні конвертера є, як правило, нерозплавлений металевий брукт, внаслідок чого дійсний перегрів металу нижче вимірюваного.

Швидкість поширення звуку у ванні виражається формулою

$$w = l / \Delta \tau_{3B}, \quad (18)$$

де l – відстань, яку проходить звук, тобто відстань між джерелом і приймачем ультразвукових коливань, м; $\Delta \tau_{3B}$ – інтервал часу проходження звуком цієї відстані, с.

Розглядаючи співвідношення (15)–(18) разом, отримуємо

$$t = \beta_0 + \beta_1 / \Delta \tau_{3B} - \sqrt{\beta_2 / (\beta_3 + \beta_4 v_C^{0.7})} + \beta_5 C, \quad (19)$$

де β_0, \dots, β_5 – коефіцієнти.

Масову частку вуглецю в металі і швидкість зневуглецювання визначають за результатами хімічного аналізу газів, що відходять [7].

Коефіцієнт β_0 (°C), знаходиться за формулою

$$\beta_0 = 1530 - 0,7 \Delta t, \quad (20)$$

де Δt – похибка у визначенні температури металу на повалці в попередній плавці, °C.

Коефіцієнт β_1 , що залежить від місця установки джерела і приймача ультразвукових коливань в агрегаті, становить (с·°C/м)

$$\beta_1 = l / 2,5, \quad (21)$$

де l – відстань між джерелом і приймачем ультразвукових коливань в агрегаті, м.

Для умов 130-тонного конвертера при розміщенні в отворах футерівки джерела і приймача ультразвукових коливань один проти одного по діаметру ванни коефіцієнти становлять: $\beta_2 = 1,47 \cdot 10^7 \text{ °C}^2$; $\beta_3 = -2,37 \cdot 10^7 \text{ °C}^2 (\text{хв}/\%)^{0.7}$; $\beta_4 = -80 \text{ °C}/\%$. Джерело і приймач ультразвукових коливань установлювали в отвори футерівки конвертера на горизонті, що має мінімальне зношення (для 130-тонних конвертерів – 5-й, 6-й ряд цегли від днища). Як джерело і приймач випромінювання використовували п'єзомагнітний складний вібратор з насадкою з дібориду цирконію, частота випромінювання – 49 кГц, потужність 100 В·А в імпульсі.

Промислове випробування методу показало, що похибка контролю температури ванни порівняно з вимірюванням термопарою, що занурюється в метал на повалці конвертера, не перевищувала 26 °C.

Для конвертерів, в яких важко установлювати спеціальні вогнетривкі блоки в футерівку, запропоновано пристрій, що вміщує два електроди: один знаходиться у футерівці нижче рівня металу, а другий – в ядрі факела газів, що

відходять із конвертера. В основі пристрою лежить визначення струму термоелектронної емісії з поверхні розплавленого металу, величина якого зв'язана з температурою металу, і роботи виходу електронів. Вимірювання струмів провідності в режимі насичення між електродами і металом при однакових додатній і від'ємній напрузі на електроді дає можливість визначити струм термоемісії з поверхні металу, а зміна контактної різниці потенціалів між електродами і металом – визначити роботу виходу електронів з поверхні металу під час продувки.

Електричний струм у факелі кисневого конвертера зумовлений наявністю в ньому іонів і електронів. Внаслідок нижчої рухливості іонів порівняно з електронами струм провідності в режимі насичення обмежується іонною складовою струму з плазми.

При від'ємній відносно ванни напрузі на електроді струм насичення становить

$$I_1 = 2 S_e j_i, \quad (22)$$

де I_1 – струм насичення при від'ємній напрузі на електроді, А; S_e – площа емітуючої поверхні електрода, що визначається його геометрією, м²; j_i – густина іонного струму, А/м².

При додатній напрузі на електроді проходить явне збільшення іонного струму на величину струму термоемісії з поверхні металу

$$I_2 = 2[(S_m - S_x)j_i + S_m j_e], \quad (23)$$

де I_2 – струм насичення при додатній напрузі на електроді, А; S_m – площа емітуючої поверхні металу (визначається геометрією конвертера), м²; S_x – площа холодної (неемітуючої) поверхні, електрично контактуючої з емітуючою поверхнею металу (визначається конструкцією конвертера і місцем розміщення електрода), м²; j_e – густина термоемісійного струму, А/м².

Густина термоемісійного струму визначається температурою металу і роботою виходу електронів:

$$J_e = \alpha_0 T^2 \cdot 10^{-(5040/T)\psi}, \quad (24)$$

де α_0 – річардсонівська термоелектронна стала, А/(м²К²); T – температура металу, К; ψ – робота виходу електронів із поверхні металу, В.

Оскільки поверхня розплаву являє собою суміш металу і шлаку, то величина ψ для такої поверхні перебуває в інтервалі 3,8–5,3 В, що

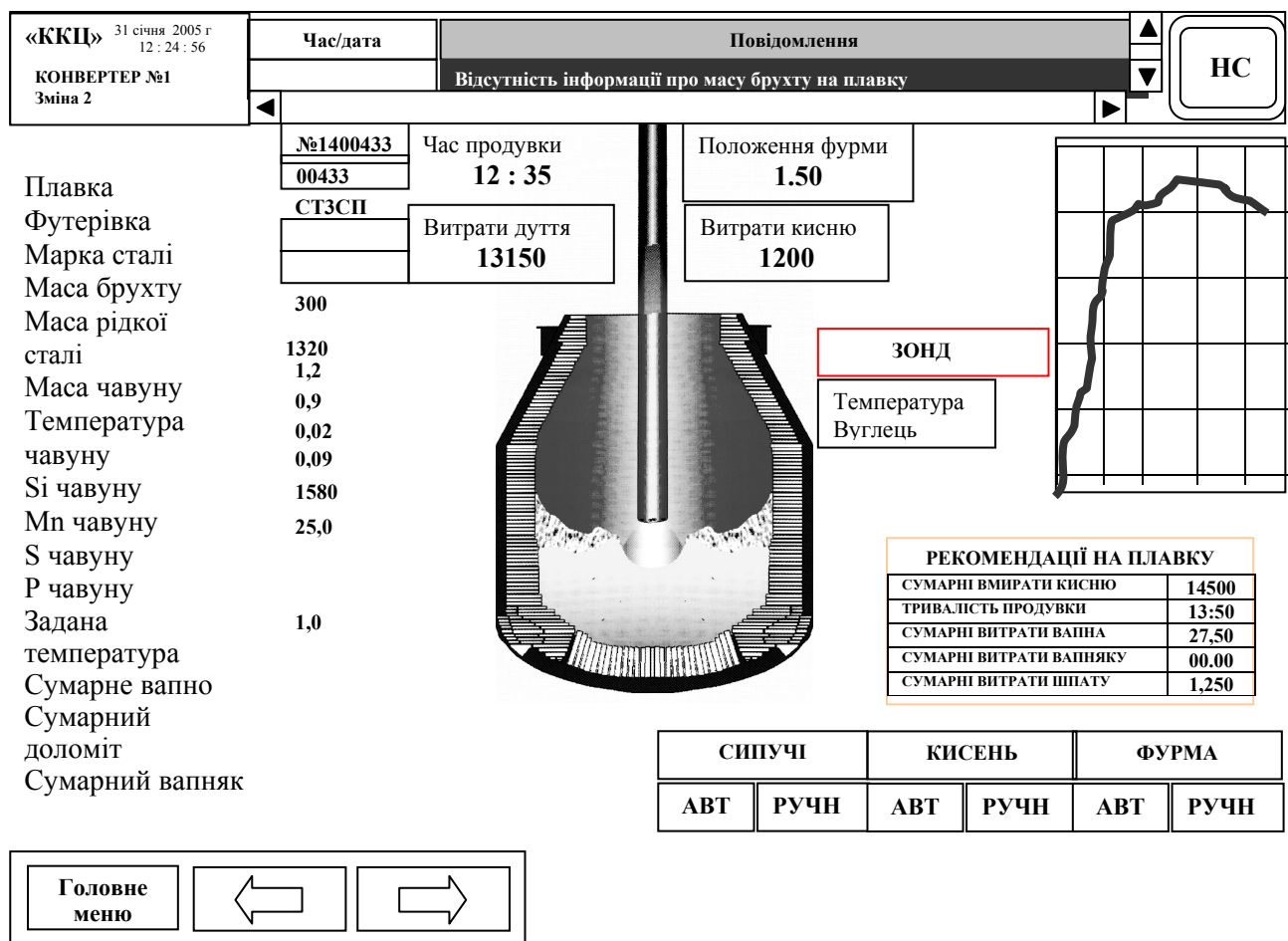


Рис. 2. Відеокадр “Рекомендації по керуванню плавкою”

для характерних температур дає значення термометричного струму $\sim 10^2 \text{A}$.

Зміна ψ за рахунок коливань хімічного складу поверхні розплаву протягом продувки контролюється зміною контактної різниці потенціалів між електродом і ванною, наприклад, за методом Томсона–Зісмана

$$\psi = U_k + \psi_e, \quad (25)$$

U_k – контактна різниця потенціалів, В; ψ_e – робота виходу електронів з поверхні електрода, В.

Із врахуванням співвідношень (22)–(25) знаходять температуру металу з такого виразу:

$$\alpha_0 T^2 10^{-5040(U_k + \psi_e)/T} = \alpha_1 I_2 - \alpha_2 I_1, \quad (26)$$

де $\alpha_1 = 1/2 S_M$, м^{-2} ; $\alpha_2 = (1/2 S_M - S_x / 2 S_M S_e)$ м^{-2} .

Із (26) отримуємо

$$T = \frac{2 \lg(\alpha_0^{0.5} T) - 5040(U_k + \psi_e)}{\lg(\alpha_1 I_2 + \alpha_2 I_1)}. \quad (27)$$

Промислові випробування методу контролю температури на Єнакієвському металургійному заводі показали, що стандартне відхилення температури від дійсної, яка виміряна заглиблювальним зондом, не перевищує 12°C .

Для періодичного контролю температури ванни запропоновано використовувати зонд Quik-Tap розробки фірми Electro-Nite, що скидається в конвертер без зупинки продувки і призначений для вимірювання температури і окисненості [8].

Результати контролю температури ванни використовуються в АСКТП конвертерної плавки [9]. Форма подання інформації оператору-технологу наведена на рис. 2 [10].

Рекомендації охоплюють статичні розрахунки, динамічний контроль ходу конвертерної плавки і керування після вимірювання температури зондом, що занурюється.

Реалізація моделі виконана на АРМ оператора-технолога та ПЕОМ.

Висновки

Дослідження методів контролю температури конвертерної ванни показали, що можуть застосовуватися як непрямі, так і прямі методи контролю. Останні більш ефективні, але потребують оснащення цехів додатковим устаткуванням.

Створені на основі теоретичного обґрунтування моделі та методи контролю температурного режиму конвертерної плавки показали,

що стандартне відхилення робочої температури від дійсної на перевищує 12 °С при вимірюванні температури заглиблювальним зондом, а похибка контролю температури ванни порівняно з вимірюванням термопарою, що занурюється в метал при плавці, не перевищує 26 °С.

Подальші дослідження будуть проводитися у напрямку розробки системи керування температурним режимом як складової частини АСКТП конвертерної плавки.

В.С. Богусhevский, Е.А. Сергеева

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ

Проведен анализ существующих методов контроля температуры ванны. Исследованы косвенные и прямые методы контроля температурного режима по ходу продувки. Установлена зависимость между выходными параметрами конвертерной плавки и температурой. Приведены результаты внедрения полученных зависимостей в алгоритмы контроля и управления конвертерным процессом.

V.S. Bogushevsky, K.O. Sergeieva

THE CONTROL OF TEMPERATURE MODE OF BOF PROCESS

We analyze the existing methods of the bath temperature control. We study direct and indirect methods of controlling the temperature in the course of purging. We define the dependence between the output parameters of converter melting and the bath temperature. Finally, we elucidate the results obtained by implementing the dependencies in the algorithms of control of the BOF process.

1. *Богусhevский В.С., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А.* Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. – К.: НПО “Киевский институт автоматики”, 1992. – 168 с.
2. *Разработка технологии непрерывного измерения температуры в конвертере STB / М. Инуи, А. Мори, Т. Окада и др. // Экспресс-инф. Черная металлургия.* – 1990. – Вып. 21. – С. 1–3.
3. *А.с. № 1424456 СССР, МКИ^г G 01 J 5/14.* Устройство для бесконтактного измерения температуры жидкого металла / Н.С. Церковницкий, И.В. Присяжнюк, В.С. Богусhevский, А.И. Демченко, 1988.
4. *Богусhevский В.С., Сорокин Н.А., Лигоцкий И.Л.* Теплообмен холодной металлозагрузки с расплавом в ванне печи // Изв. АН СССР. Металлы. – 1989. – № 3. – С. 15–20.
5. *Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підр. / Д.Ф. Чернега, В.С. Богусhevський, Ю.Я. Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського.* – К.: Вища шк., 2006. – 504 с.
6. *Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.* Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підр. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
7. *А.с. № 1097684 СССР, МКИ^г C 21 C.* Устройство контроля содержания углерода в ванне конвертера / В.С. Богусhevский, Н.А. Сорокин, В.М. Глуховская, Е.И. Беляев, 1984.
8. *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.
9. *JIANG Xiaofang, Wang Minglin, Yang Wenyan, etc.* High Efficient Technology of Steelmaking With Low Silicon Hot Metal on Large Converter // JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL. – 2007. – **14(6)**.
10. *Qiu Ping Xiao Hong.* Temperature field for improvement of internal quality of stretching round billet // Ibid. – 2009. – **16(6)**.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
1 грудня 2009 року