МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 669.184

В.С. Богушевський, О.Е. Скачок

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ФУТЕРІВКИ КОНВЕРТЕРА

The article is about rise of control accuracy for the heat losses of converter. We achieved this due to the inclusion of the accumulating heat by lining. The basis for solution of the problem is method of elimination of a variable. We have assumed that temperature of distribution on a wall thickness of the converter could be described by equation for the end of any fusion on lining campaign. We plotted according to the equation. The graph indicates that temperature field has obviously expressed non-stationary character to a relative value of analogue of time, and then it passes in area unstable time. The pyrometric device was developed for experimental researching of the temperature field of lining. The device consists of series of platinum-rhodium thermocouple. Comparison of the settlement data to the experimental has confirmed conditions of uniqueness and a mathematical model heat transfer. The value of calculated temperature well coincides with corresponding experimental data. We received the mathematical model of heat transfer based on the conditions of uniqueness. The calculated values of temperature coincide with experimental, and the average deviation is 12.1 °C.

Keywords: BOF; lining; heat exchange; heat losses; pyrometric equipment.

Вступ

У кисневих конвертерах, як правило, не використовуються зовнішні джерела теплоти, тому для них істотне значення має рівень теплових втрат. На температурний режим продувки дуже впливає теплова робота футерівки конвертера, що активно бере участь у теплообміні з продуктами рафінування.

Для підвищення точності розрахунку хімічно і термічно збалансованої шихти необхідні достовірні дані про теплові втрати на нагрівання конвертера, які становлять помітну частку в загальному балансі теплоти. Теплові втрати конвертера було розглянуто в багатьох працях [1–7], однак, у них недостатньо описано динаміку перехідних процесів прогрівання футерівки по ходу її кампанії. Зокрема, зовсім не розглянуто, за винятком емпіричних підходів, акумуляцію теплоти футерівкою. Тепловий режим плавки значно впливає на якість сталі, вихід корисного, шлакоутворення, стійкість футерівки. Найкращі показники якості сталі та зливка отримуємо при досягненні вкінці продувки деякої оптимальної температури металу, яка варіюється для різних марок сталі та способів розливу.

У багатьох використовуваних донині методиках розрахунку теплового балансу конвертерної плавки та відповідних програмних рішеннях застаріли вихідні дані й низка розрахункових залежностей. Застосовувані, в т.ч. у навчальних цілях, прикладні програми реалізовано в застарілих пакетах програмування, які на сьогодні не можуть дати точної інформації.

Постановка задачі

Метою досліджень є підвищення точності контролю теплових втрат конвертера через врахування теплоти, акумульованої футерівкою.

Результати досліджень

Під час продувки конвертерної ванни між нею і футерівкою проходить теплообмін на вогневій поверхні цегли при граничній умові третього роду відповідно до рівняння

$$\alpha(t_{\text{м}} - t\,|_{x=0}) = -\lambda_{\text{ф}}\,\frac{\partial t}{\partial x}\,|_{x=0}, \qquad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від ванни до поверхні стінки, Вт/(м^2·К); $t_{\text{м}}$ – температура рідкого металу, °С; $t\,|_{x=0}$ – температура теплоспринмальної поверхні футерівки, °С; x – лінійна координата у напрямку, перпендикулярному до поверхні, початок відліку якої суміщено із фронтом зношування футерівки, м; $\lambda_{\text{ф}}$ – теплопровідність футерівки, Вт/(м·К); $\partial\tau / \partial x$ – градієнт температури на теплоспринмальній поверхні, °С/м.

За реальними даними після нескладних перетворень отримаємо

$$t_{\text{м}} - t|_{x=0} = \lim_{\frac{\lambda_{\text{ф}}}{\alpha}\to 0}\left(-\frac{\lambda_{\text{ф}}}{\alpha}\,\frac{\partial t}{\partial x}\,|_{x=0}\right) = 0, \qquad (2)$$

тобто температура поверхні футерівки, що контактує з рідким металом, наближається до температури металу. Внаслідок цього гранична

умова третього роду може бути замінена граничною умовою першого роду.

Аналіз температурного стану футерівки конвертера у новому масштабі часу в момент закінчення кожної продувки, якщо знехтувати коливаннями температури готового металу по ходу кампанії футерівки, свідчить, що рухома поверхня стінки взаємодіє з ванною при граничній умові першого роду у простішому його вигляді – ізотермічному – $t|_{x=0} = \bar{t}_{\text{м}} = \text{const}$, де $\bar{t}_{\text{м}}$ – середня за кампанію футерівки температура металу у кінці продувки, °С.

Залежність середньозваженої температури зовнішньої поверхні кожуха конвертера по ходу кампанії футерівки отримано апроксимацією експериментальних даних:

$$\bar{t}_{\text{н}} = \Theta\left[1 - \exp\left(\frac{\nu_1(N+\eta_1)}{N*}\right)\right], \qquad (3)$$

де $\bar{t}_{\text{н}}$ – середньозважена температура зовнішньої поверхні кожуха, °С; Θ, ν_1, η_1 – емпіричні коефіцієнти; $N*$ – останній номер плавки по кампанії футерівки (середня стійкість футерівки).

Унаслідок високої теплопровідності металевого кожуха порівняно з вогнетривкою цеглою просторовою зміною температури у ній нехтуємо.

Температурне поле в стінці описується рівнянням збереження енергії. Вихідні дані для його визначення мають такий вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial N} = 60 a_{\text{ф}} \bar{\tau}_{\text{пл}} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, (N > 0, 0 \le x \le \delta);$$

$$\delta = R_{\text{н.ф}} - \sqrt{R_0^2 + \frac{10\bar{g}_{\text{ф}} m_{\text{ч}} N}{\pi l \rho_{\text{ф}}}};$$

$$t|_{N=0} = t(x, \tau^*); \qquad (4)$$

$$t|_{x=0} = \bar{t}_{\text{м}};$$

$$t|_{x=\delta} = \bar{t}_{\text{н}} = \Theta\left[1 - \exp\left(-\frac{\nu_1(N+\eta_1)}{N^*}\right)\right],$$

де $a_{\text{ф}}$ – коефіцієнт температуропровідності футерівки при її середньоінтегральній температурі, м^2/с; $\bar{\tau}_{\text{пл}}$ – середня тривалість плавки, хв; δ_0, δ – товщини стінки нової футерівки і по ходу її кампанії, м; τ^* – час, що відповідає кінцю сушки, розігріву й обпаленню футерівки, год; $R_{\text{н.ф}}$ – радіус нової футерівки, м; $\bar{g}_{\text{ф}}$ – питоме середнє масове зношення футерівки за плавку, т; $\rho_{\text{ф}}$ – щільність футерівки, т/м^3; $m_{\text{ч}}$ – маса чавуну, т.

Загальний метод розв'язання крайових задач для тіл із рухомими границями пов'язаний з аналізом системи інтегральних рівнянь типу Вольтера другого роду [8].

Методом кінцевих інтегральних перетворень Г.А. Грінберга отримують рішення у вигляді складних залежностей, використання яких для інженерних розрахунків становлять значні труднощі, не виправдані у рамках АСУ ТП [9]. На нашу думку, спроба описати температурне поле точними методами становить суто академічний інтерес, далекий від практичного використання.

В основу рішення, що пропонується нами, покладено метод виключення змінної, який засновано на попередньому експериментальному вивченні об'єкта [10]. Апріорно приймаємо, що розподілення температури по товщині стінки конвертера для кінця будь-якої плавки по кампанії футерівки приблизно описується рівнянням

$$t = A_1 - A_2 x^n. \qquad (5)$$

Коефіцієнти A_1 і A_2 знаходимо із граничних співвідношень, а показник ступеня n визначаємо із фізичних уявлень про перехідний процес прогріву футерівки по ходу її кампанії. Пропускаючи проміжні викладки і переходячи до координати $y = \delta - x$, наведемо вираз для просторово-часового розподілення температури у футерівці:

$$t = \bar{t}_{\text{м}} - \left\{\bar{t}_{\text{м}} - \Theta\left[1 - \exp\left(-\frac{\nu_1(N+\eta_1)}{N^*}\right)\right]\right\} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{y}{R_{\text{н.ф}} - \sqrt{R_0^2 + \frac{10\bar{g}_{\text{ф}}\bar{m}_{\text{ч}} N}{\pi L \rho_{\text{ф}}}}}\right)^{1-\exp\left(-\frac{\nu_2(N+\eta_2)}{N^*}\right)}, \qquad (6)$$

де t – температура футерівки, °С; η_2, γ_2 – параметри, що характеризують профіль температури у стінці і залежать, відповідно, від початкових умов і динамічних властивостей об'єкта. На рис. 1 наведено розрахункове розподілення температури по товщині футерівки по ходу її кампанії.

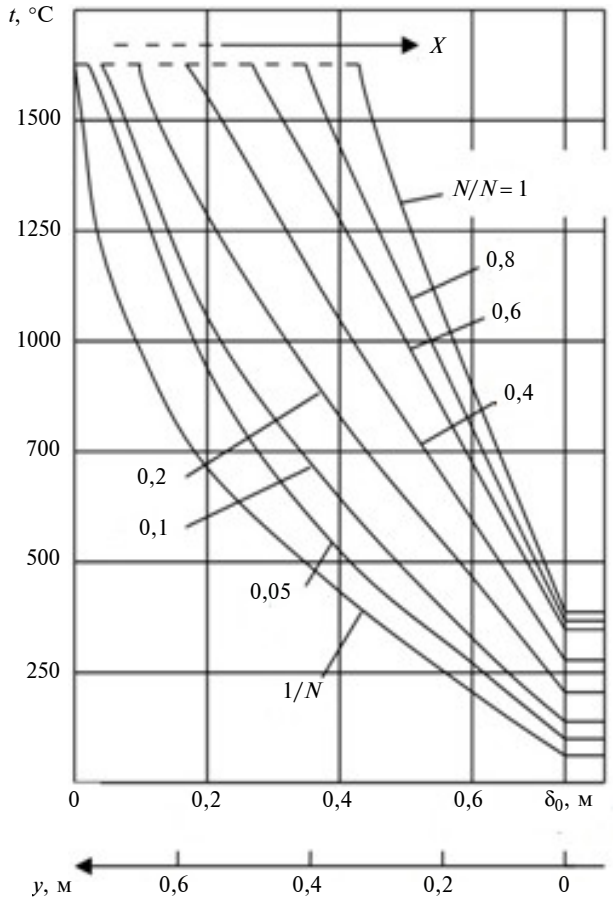


Рис. 1. Розрахункове розподілення температури у футерівці для моментів закінчення продувки

Як видно із графіка, температурне поле має чітко виражений нестаціонарний характер до відносного значення аналогу часу, що дорівнює 0,2, після чого переходить в область квазісталого стану, який змінює свій рівень по ходу кампанії футерівки внаслідок її зношення. У квазісталому стані $\left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right) \approx 0$ досягається швидше у випадку прогрітої кладки, тобто чим вище значення $t|_{N=0}$.

Реальна картина теплової роботи футерівки конвертера може бути відображена з допомогою достовірних експериментальних даних [11, 12]. У ході експериментального дослідження температурного поля футерівки по ходу її кампанії було створено пірометричний пристрій, що складається з низки платинородієвих термопар із термоелектродного дроту градуювання ПР-30/6, які розміщені в соломці й східчасто запресовані за допомогою порошку таких самих теплофізичних властивостей, що й основна маса футерівки конвертера. Термопари встановлюються на заданих відстанях одна від одної у гнізді стандартної вогнетривкої цегли (рис. 2). Інтервали розміщення гарячих спаїв по глибині гнізда вибираються в оберненій залежності від очікуваних градієнтів температури. Гарячі спаї захищені газощільним покриттям, що нанесене напиленням.

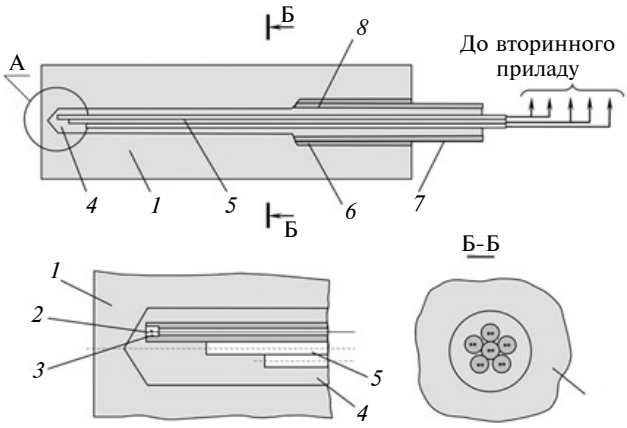


Рис. 2. Пристрій контролю температурного поля футерівки конвертера: *1* – вогнетривка цегла з гніздом; *2* – гарячий спай термопари; *3* – газощільне покриття; *4* – засипка, що спікається; *5* – двоканальна соломка; *6* – ущільнення; *7* – захисна труба; *8* – вогнетривка пробка

Таким чином, надійний, безпосередній контакт гарячих спаїв з вогнетривом забезпечив теплообмін між ними тільки теплопровідністю. Пристрій установлювали у футерівку в районі шлакового поясу.

Пристрій має інструментальні й методичні похибки. Вибором стабільних термоелектродів, створенням раціональної конструкції й відповідних умов роботи гарячих і холодних спаїв інструментальні похибки зведені до мінімально можливих, що не перевищують паспортних значень.

До методичних похибок належать випадкові, викликані неточністю монтажу гарячих спаїв у гнізді вогнетривкої цегли й її самої в футерівці конвертера, і систематичні, зумовлені тепловою природою. Останні помилки зумовлені зміщенням гарячих спаїв унаслідок термічного розширення соломки і потоком теплоти по термоелектродах. Цю похибку можна значно зменшити прокладкою термоелектродів з чутливим термоелементом по ізотермічних площинах, але таке рішення суттєво ускладнює конструкцію й збільшує потенційну небезпеку проривання рідкого металу.

Термоприймач, яким би малим він не був, є для досліджуваного середовища чужорідним тілом, тому тією чи іншою мірою спотворює температурне поле. Випадок спотворювального впливу термопари, що розміщена перпендикулярно до ізотермічної площини, на температурне поле напівобмеженої стінки із матеріалу з низькою теплопровідністю від збурення при граничній умові другого роду через сумісне рішення рівнянь теплообміну термоприймача із середовищем навколо нього для стадій сталого і несталого збурень розглянуто Д.В. Беком [13]. Методом кінцевих різниць він розв'язав задачу нестаціонарної теплопровідності, отримав значення коефіцієнта термічного спотворення температури в зоні гарячого спаю термопари залежно від співвідношення теплофізичних властивостей вимірювального середовища і термоприймача, а також від його розміру r і відносної глибини закладення r/X.

У нашому випадку значення відношень теплопровідності й об'ємної теплоємності вогнетривкого матеріалу футерівки і термоелектродів наближені, відповідно, до значень 0,1 і 1. Результати машинного рішення наведено у вигляді графіка на рис. 3.

Змінюваний у часі критерій Фур'є визначається за формулою

$$\mathrm{Fo}_\tau = \frac{a_\phi \tau}{r^2}, \qquad (7)$$

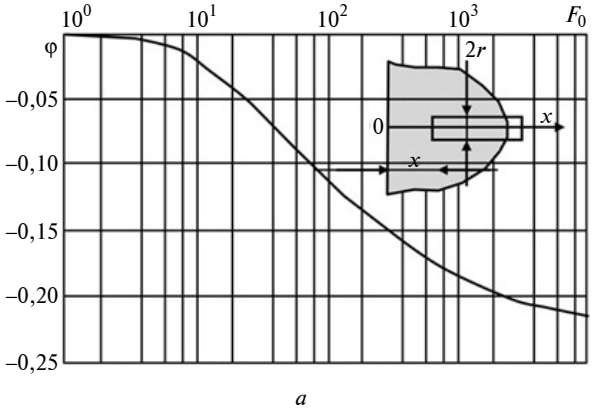
де r – радіус термоелектрода, який у нашому випадку дорівнює 0,00025 м.

Розрахунок за даними рис. 3, *а* часу настання сталого температурного збурення в області значень $\mathrm{Fo}_\tau \geq 5000$ дає значення $\tau \geq 5$ хв, тобто на порядок менше тривалості конвертерної плавки. Це свідчить про те, що в умовах контролю температурного поля футерівки конвертера без великої похибки можна розглядати тільки випадок статичного термічного спотворення при сталому температурному збуренні.

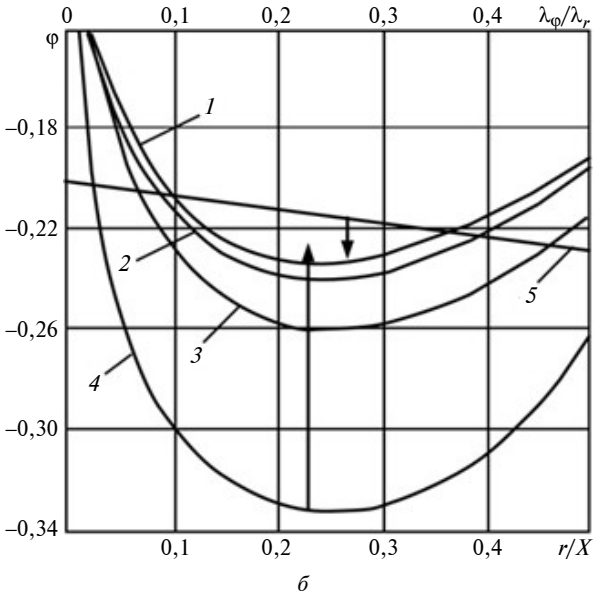
Розрахункова формула для оцінки поправки до виміряної з допомогою пристрою температури має вигляд

$$\Delta t\,|_{x=X} = \varphi\,|_{x=X}\; r\,\frac{\lambda_\phi}{\lambda_{\text{тм}}}\,\frac{\partial t}{\partial x}\,|_{x=0}, \qquad (8)$$

де $\Delta t\,|_{x=X} = t\,|_{x=X} - t_{\text{тм}}\,|_{x=X}$ – поправка, °С; $t\,|_{x=X}$, $t_{\text{тм}}\,|_{x=X}$ – температура, відповідно, футерівки і по показаннях термопари в точці з координатою X, °С; $\varphi\,|_{x=X}$ – коефіцієнт термічного спотворення температури в зоні гарячого спаю термопари з координатою X; $\lambda_{\text{тм}}$ – теплопровідність термоелектрода при середній температурі, Вт/(м·К).



а



б

Рис. 3. Коефіцієнт термічного спотворення температури у зоні гарячого спаю термопари, що знаходиться у матеріалі з низькою теплопровідністю, при постійній у часі граничній умові другого роду: *а* – динамічний при несталому температурному збуренні; *б* – статичний при сталому температурному збуренні; *1*, *2*, *3*, *4* – $\varphi = f(\lambda_\phi / \lambda_\tau)$ при r / X, що, відповідно, дорівнює 0,1, 0,25, 0,5, ∞; *5* – $\varphi = f(r / X)$ при $\lambda_\phi / \lambda_\tau = 0{,}1$

Враховуючи лінійний характер залежності $\varphi = f(r / X)$ (рис. 3, *б*, залежність *5*), значення градієнта температури на теплосприймальній поверхні футерівки найбільш надійно визначається експериментально за даними лінійної екстраполяції на вогневу поверхню футерівки показів двох найближче розташованих термопар і виміру температури ванни термопарою занурення. Так як при $x = 0$ $r / X \to \infty$, можна записати

$$\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{t_{\text{м ф}} - t_T\big|_{r/X\to\infty}}{\varphi\big|_{r/X\to\infty}\, r\,\dfrac{\lambda_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{тм}}}}, \qquad (9)$$

де $t_{\text{м ф}}$ – температура металу фактична за показами термопари занурення, °С; $t_T\big|_{r/X\to\infty}$ – температура за показами гіпотетичної термопари, гарячий спай якої закладено врівень з вогневою поверхнею футерівки, °С; $\varphi\big|_{r/X\to\infty}$ – коефіцієнт термічного спотворення температури на вогневій поверхні футерівки (рис. 3, *б*, залежність *4*).

Використовуючи співвідношення (8) і (9) визначаємо температуру футерівки в точках закладки гарячих спаїв термопар:

$$t\big|_{x=X} = t_T\big|_{x=X} + \frac{\varphi\big|_{x=X}}{\varphi\big|_{r/x\to\infty}}\left(\text{t}_{\text{тм}} - t_{\text{ф}}\big|_{r/X\to\infty}\right). \qquad (10)$$

Значення методичної похибки внаслідок відтоку теплоти по термоелектродах у два–три рази перевищує інструментальну похибку термоелектричного комплекту.

Оскільки футерівка конвертера відображає вплив граничної умови на вогневій поверхні з деяким запізненням, порівняння розрахункового розподілення температури по ходу кампанії з дослідними даними (рис. 4) проведено за максимальними показами термопар після кожного циклу плавки із врахуванням поправок, які компенсують методичну похибку, викликану відтоком теплоти по термоелектродах. Розрахункове значення температури задовільно збігається з отриманими експериментальними даними. Середньоквадратичне відхилення становить 12,1 °С, що свідчить про доволі повне охоплення впливаючих факторів і правомірність прийнятих допущень.

Результати досліджень включено в динамічну модель контролю температурного режиму конвертерної плавки [14, 15] і використано при прогнозуванні температурного режиму ванни плавильної печі [16].

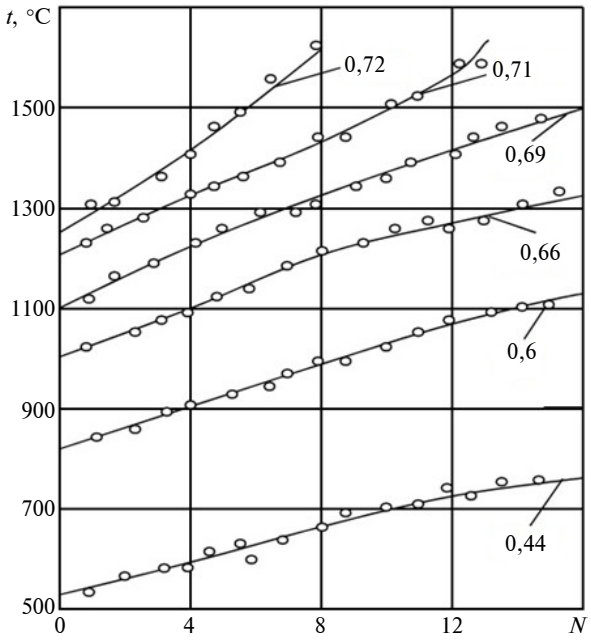


Рис. 4. Розподілення розрахункової температури у фіксованих точках футерівки: **o** – дослідні точки за максимальними показами термопар після закінчення продувки; цифри біля кривих – глибина закладення гарячих спаїв термопар від зовнішньої поверхні футерівки *y*, м; товщина нової футерівки 0,735 м

Висновки

У ході дослідження розроблено пірометричний пристрій, що являє собою низку платинородієвих термопар із термоелектродного дроту градуювання ПР-30/6, розміщених у соломці й східчасто запресованих за допомогою порошку таких самих теплофізичних властивостей, що й основна маса футерівки конвертера. Було враховано інструментальні й методичні похибки, за рахунок чого досягнута висока достовірність отриманих даних. Дослідження, проведені на промислових конвертерах, виявили, що під час продувки конвертерної ванни між нею і футерівкою проходить теплообмін на вогневій поверхні цегли при граничній умові третього роду. За прийнятими граничними умовами однозначності було отримано математичну модель теплопереносу. Розрахована температура за математичною моделлю добре узгоджується з температурою, отриманою експериментальним методом, при цьому середньоквадратичне відхилення становить 12,1 °С.

Подальші дослідження будуть направлені на адаптацію моделі для умов будь-якої плавильної печі.

Список літератури

1. *Гулыга Д.В., Сущенко А.В.* Модель расчета параметров кислородно-конвертерной плавки // Сталь. – 2003. – № 12. – С. 19–24.
2. *Комплексная* технология ведения конвертерной плавки в ОАО "ММК им. Ильича" / В.С. Бойко, А.А. Ларионов, А.В. Сущенко и др. // Там же. – 2007. – № 1. – С. 17–20.
3. *Бойченко Б.М.* Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія) / Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. – Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ", 2004. – 454 с.
4. *Научные* основы современных сталеплавильных процессов / А.В. Явойский, П.С. Харлашин, В.С. Волошин и др. – Мариуполь, 2003. – 276 с.
5. *Гостев В.И.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радіоаматор, 2008. – 972 с.
6. *J.C. Huber et al.*, "Dynamic thermal characterization of BOF: a tool for energy optimization," Metall. Res. Technol., vol. 104, no. 11, pp. 534–539, 2007.
7. *Зайцев А.И., Косырев К.Л., Родионова И.Г.* Современные тенденции развития металлургической технологии для достижения высокого комплекса служебных свойств и качественных показателей стали // Пробл. черн. металлург. и материаловед. – 2012. – № 3. – С. 5–13.
8. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнение математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
9. *Сурков Г.А., Крылович В.И.* О решении одномерных задач нестационарной теплопроводности с подвижной границей методом интегральных преобразований // Тепло- и массоперенос. – Минск: Наука и техн., 1966. – **6**. – С. 132–139.
10. *Вейник А.И.* Приближенный метод решения задач теплопроводности // Инж.-физ. журн. – 1958. – **1**, № 2. – С. 3–12.
11. *Богушевський В.С., Сергеєва К.О.* Контроль температурного режиму конвертерної плавки // Наук. вісті НТУУ "КПІ". – 2009. – № 6. – С. 75–80.
12. *Богушевський В.С., Сергеєва К.О.* Методи вимірювання температури сталі у конвертері // Наук. нотат. Міжвуз. збірн. – Луцьк, 2011. – № 33. – С. 31–36.
13. *Бек Д.В.* Искажающее влияние термопары на температурное поле в материалах с низкой теплопроводностью // Теплопередача: Тр. американ. общества инж.-механ. – 1962. – Сер. С. – **84**, № 2. – С. 33–42.
14. *Богушевский В.С., Сергеева Е.А., Жук С.В.* Динамическая модель управления температурным режимом конвертерной ванны // Металл и литье Украины. – 2011. – № 5. – С. 24–28.
15. *Богушевський В.С., Жук С.В.* Теплові втрати конвертера як складові динамічної моделі контролю температурного режиму // Наук. нотат. Міжвуз. збірн. – Луцьк, 2012. – № 38. – С. 6–9.
16. *Богушевський В.С., Антоневич А.К.* Прогнозування температурного режиму ванни плавильної печі // Наук. вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 2. – С. 108–113.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
7 листопада 2014 року