

УДК 681.88.4

С.В. Бейцун, доцент, к.т.н.

М.В. Михайловський, доцент, к.т.н.

Є.О. Білецький, студент

ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВША

Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

На основі аналізу конструкції сталеразливочного ковша розроблена математическа модель його теплового стану, яка реалізована набором типових динамічних звеньєв в пакеті структурного моделювання «Matlab Simulink». Модель дозволяє оперативно прогнозувати температуру розплаву в час операцій внепечної обробки.

Ключеві слова: сталеразливочний ковш, теплове стан, внепечна обробка, структурне моделювання, прогнозування температури розплаву

На підставі аналізу конструкції сталерозливного ковша розроблено математичну модель його теплового стану, яку реалізовано набором типових динамічних ланок у пакеті структурного моделювання «Matlab Simulink». Модель дозволяє оперативно прогнозувати температуру розплаву протягом операцій позапічної обробки.

Ключові слова: сталерозливний ківш, тепловий стан, позапічна обробка, структурне моделювання, прогнозування температури розплаву

On the basis of analysis for construction of casting ladle the mathematical model of its thermal state, which is realized by the set of typical dynamic links at the package of structural modeling of «Matlab Simulink», is worked out. A model allows operatively to forecast the temperature of fusion during the operations of out-of-furnace treatment.

Keywords: casting ladle, thermal state, out-of-furnace treatment, structural modeling, forecasting of temperature fusion

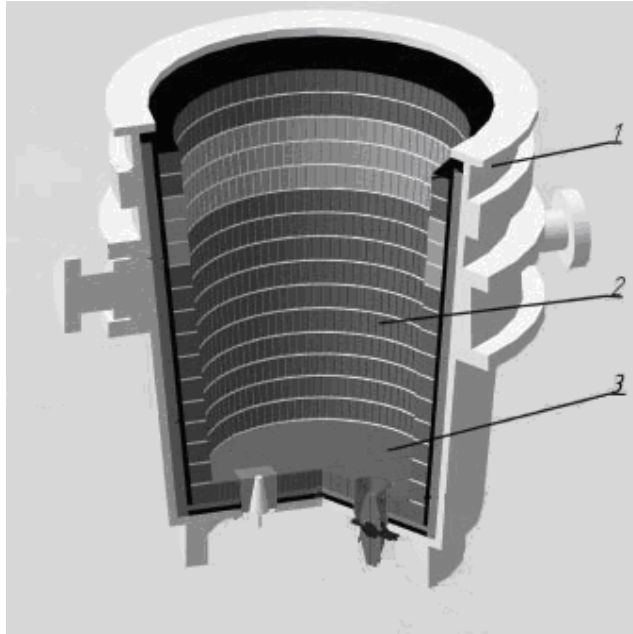
Вступ. Одним з головних параметрів, що обмежують тривалість технологічних операцій із сталерозливними ковшами, є температура розплаву [1]. Зниження її рівня пов'язане з тепловими втратами на нагрівання футеровки ковша, передаванням теплоти через неї та випромінюванням від відкритої поверхні розплаву. Методику розрахунків розподілу температури щодо футеровки ковша під час теплової дії на неї розплаву наведено у багатьох роботах, зокрема в [2-4]. У роботі [5] розроблено математичну модель нестационарного перенесення теплоти через вогнетривку футеровку ковша, а в роботі [6] наведено методику розрахунків теплових втрат розплаву під час його перебування у сталерозливному ковші.

Постановка задачі. Для створення АСУ позапічної обробки сталі [7] необхідно не тільки оперативно прогнозування температури розплаву, але й можливість дослідження впливу різноманітних чинників на динаміку теплового стану сталерозливного ковша. В зв'язку з цим поставлено завдання розробити відповідну комп'ютерну модель з використанням пакету структурного моделювання «Matlab Simulink».

Основний матеріал дослідження. Сталерозливний ківш (рис. 1) є відкритою футерованою ємкістю, яка призначено для приймання металу та частини шлаку, витримки або позапічної обробки металу та подальшого його розливання. Ківш має зва-

рений кожух, виготовлений із сталевих листів товщиною до 40 мм у формі усіченого конуса з розширенням догори. Днище ковша може бути пласким або мати сферичну форму (у ковшах великого об'єму).

Для спрощення сталерозливний ківш подавали у вигляді циліндру із пласким днищем. У математичній моделі враховують теплові втрати через бокову поверхню та днище ковша, а також випромінювання від поверхні розплаву, яка покрита шаром шлаку (частково або повністю).



1 - сталевий корпус; 2 - футерівка стінки; 3 - футерівка днища

Рисунок 1 – Схема футеровки сталерозливного ковша:

Для розрахунків процесу нестационарного теплообміну під час охолодження розплаву в сталерозливному ковші використовували нижченаведені вихідні данні:

– геометричні розміри ванни та масу розплаву (зовнішні розміри ковша є фіксованими, внутрішні – коливаються; при цьому, відповідно, змінюється і маса розплаву);

– початкову температуру розплаву та внутрішньої поверхні футеровки ковша, а також температуру довкілля;

– долю відкритої (вільної від шлаку) поверхні розплаву в ковші;

– товщину та кількість шарів футеровки;

– теплофізичні властивості розплаву та матеріалів футеровки.

Початкове поле температури у стінці та днищі сталерозливного ковша розраховують за заданими граничними умовами першого роду – постійним значенням температури внутрішньої поверхні футеровки ковша та зовнішньої поверхні броне, які є прийнятими відповідно до даних промислових експериментів.

Моделювання нестационарного тепловіддавання від розплаву через багатопарові стінку та днище сталерозливного ковша виконують за вихідними даними та початковим полем температури з урахуванням змінювання температури розплаву.

Змінювання температури розплаву ΔT_m на кожному кроці часу моделювання Δt розраховують за формулою:

$$\Delta T_m = -\frac{(Q_{st} + Q_{dn} + Q_{pov}) \cdot \Delta \tau}{C_m \cdot M_m}, \quad (1)$$

де Q_{st} , Q_{dn} – конвективний тепловий потік від розплаву до стінки ковша та від розплаву до днища ковша, Вт, відповідно; Q_{pov} – променисто-конвективний тепловий потік від поверхні розплаву, Вт; C_m , M_m – теплоємність, Дж/(кг·К), і маса розплаву, кг, відповідно.

Змінювання температури ΔT_i i -го циліндричного шару футеровки стінки ковша обчислюють як

$$\Delta T_i = \frac{(Q_i^w - Q_{i+1}^w) \cdot \Delta \tau}{0,25 C_i \cdot \pi \cdot \rho_i \cdot (d_{in}^2 - d_{out}^2) \cdot H_m}, \quad (2)$$

де C_i , ρ_i – відповідно теплоємність, Дж/(кг·К), і щільність, кг/м³, матеріалу i -го шару футеровки; d_i , d_{i+1} – внутрішній і зовнішній діаметр i -го шару футеровки, м, відповідно; H_m – висота ванни розплаву в ковші, м; Q_i^w , Q_{i+1}^w – тепловий потік через внутрішню та зовнішню поверхню i -го шару футеровки, Вт, відповідно.

Теплові потоки у рівнянні (2) визначають за формулами:

$$\begin{aligned} Q_i^w &= \alpha_m \cdot \pi \cdot d_{in} \cdot \dot{I}_m \cdot (T_m - T_1); \\ Q_{i+1}^w &= \frac{2\lambda_i \cdot \pi \cdot \dot{I}_m \cdot (T_i - T_{i+1})}{\ln(d_{i+1}/d_i)}; \\ Q_{n,e}^w &= \alpha_e \cdot \pi \cdot d_{out} \cdot \dot{I}_m \cdot (T_e - T_n), \end{aligned} \quad (3)$$

де α_m , α_e – відповідно коефіцієнти тепловіддавання від розплаву до футеровки та від броні ковша до доквілля, Вт/(м²·К); d_{in} , d_{out} – внутрішній і зовнішній діаметр ковша, м, відповідно; λ_i – теплопровідність i -го шару футеровки, Вт/(м·К); n – кількість шарів футеровки стінки ковша; ΔT_i – температура відповідних шарів футеровки, К; T_m , T_n , T_e – температура розплаву, зовнішньої поверхні ковша та доквілля, К, відповідно; $Q_{n,e}^w$ – тепловий потік від стінки ковша до доквілля, Вт.

Змінювання температури $\Delta T_{dn,i}$ плоских шарів футеровки днища ковша розраховують за формулою:

$$\Delta T_{dn,i} = \frac{(Q_i - Q_{i+1}) \cdot \Delta \tau}{C_i \cdot \rho_i \cdot F_{dni} \cdot \delta_i}, \quad (4)$$

де F_{dni} , δ_i – площа, м², і товщина i -го шару футеровки днища ковша, м, відповідно.

Теплові потоки у рівнянні (4) обчислюють за формулами:

$$\begin{aligned} Q_{dn} &= \alpha_m \cdot F_{dn} \cdot (T_m - T_1); \\ Q_i &= \frac{\lambda_i \cdot F_{dni} \cdot (T_i - T_1)}{\delta_i}; \\ Q_{m,e}^{dn} &= \alpha_e \cdot F_{dn} \cdot (T_n - T_e), \end{aligned} \quad (5)$$

де m – кількість шарів футеровки днища; $Q_{m,e}^{dn}$ – тепловий потік від днища до довкілля, Вт. Позначення інших параметрів формул (5) відповідають аналогічним параметрам формул (3) з урахуванням пласкої форми днища ковша.

Променистий тепловий потік від поверхні розплаву визначають відповідно до закону Стефана-Больцмана

$$Q_r = \varepsilon_0 \cdot \tilde{N}_0 \cdot S_m \cdot (T_m^4 - T_e^4), \quad (6)$$

де ε_0 – приведена ступінь чорноти системи «розплав-довкілля» з урахуванням частки відкритої (вільної від шлаку) поверхні металу, $\varepsilon_0 = (1/\varepsilon_d + 1/\varepsilon_e - 1)^{-1}$, ε_m , ε_e – ступінь чорноти поверхні розплаву та довкілля, відповідно; \tilde{N}_0 – постійна Больцмана; F_m – площа відкритої поверхні розплаву, м²; T_m , T_e – абсолютні температури розплаву та довкілля, відповідно, К.

Окрім того, від поверхні розплаву відходить конвективний тепловий потік

$$Q_{\tilde{n}} = 0,25 \alpha_{\tilde{n}} \cdot \pi \cdot d_m^2 \cdot (T_m - T_e), \quad (7)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддавання конвекцією від поверхні розплаву до довкілля, Вт/(м²·К); T_m , T_e – відповідно температура розплаву та довкілля, К.

Тоді загальний тепловий потік від поверхні розплаву

$$Q_{pov} = Q_r + Q_c. \quad (8)$$

Комп'ютерну модель теплового стану ковша реалізовано у пакеті «Matlab Simulink». Модель складається із трьох підсистем (рис. 2), які моделюють тепловіддавання від поверхні розплаву та перенесення теплоти через стінку та днище ковша. Кожна підсистема є набором взаємозв'язаних типових динамічних ланок, які реалізують математичну модель теплообміну (1)-(7). Всі елементи пов'язані між собою та відображають динаміку температури розплаву й шарів футеровки, а також теплових потоків у сталерозливному ковші протягом часу моделювання.

Змінювання температури розплаву, згідно із формулою (1), моделює інтегруюча ланка, входами якої є теплові потоки від розплаву до стінки $Q(st)$ і днища $Q(dn)$ та від його поверхні $Q(pov)$ (рис. 2,а).

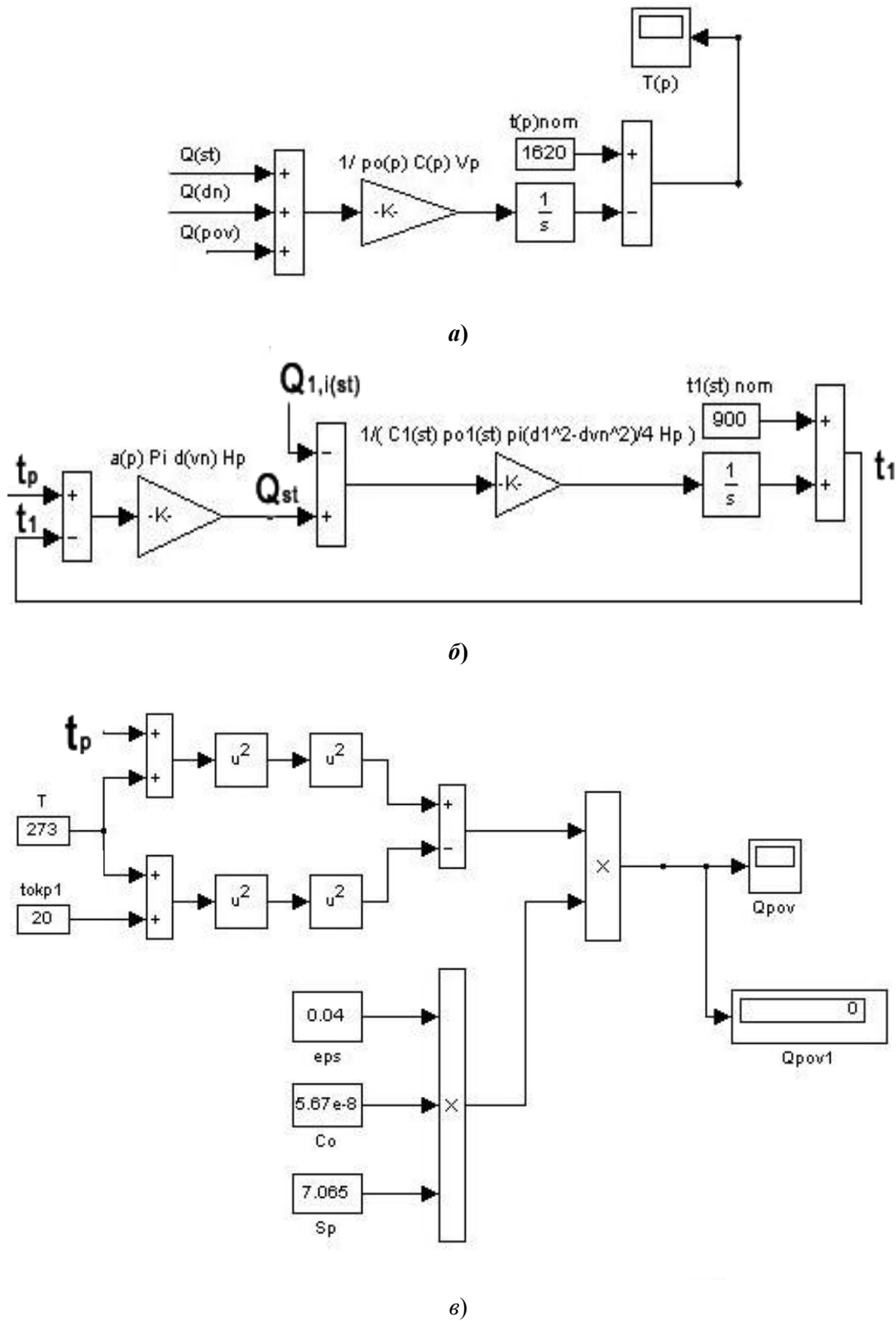
Змінювання температури i -го шару стінки ΔT_i за формулою (2) та теплових потоків шарів стінки сталерозливного ковша Q_{st} за формулою (3) моделюють відповідно до схеми, поданої на рис. 2,б. Аналогічний вигляд має схема моделювання температури за формулою (4) та теплових потоків шарів днища ковша за формулою (5).

Змінювання теплового потоку від поверхні розплаву до довкілля Q_{pov} (рис. 2,в) реалізовано згідно із формулою (6), де вхідними параметрами є значення температури розплаву T_m на відповідний момент часу та температури довкілля T_e .

Комп'ютерна схема теплового стану сталерозливного ковша, що реалізована у програмному середовищі «Simulink», забезпечує відображення динаміки температури розплаву впродовж часу технологічних операцій та теплообміну між розплавом і стінкою та днищем ковша, а також довкіллям.

Як зразок для розрахунків було вибрано 120-тонний сталерозливний ківш із зовнішнім діаметром 3,6 м та висотою 4,3 м. Початкова температура розплаву в ковші після випуску, в середньому за натурними даними, складає 1893 К, а початкова тем-

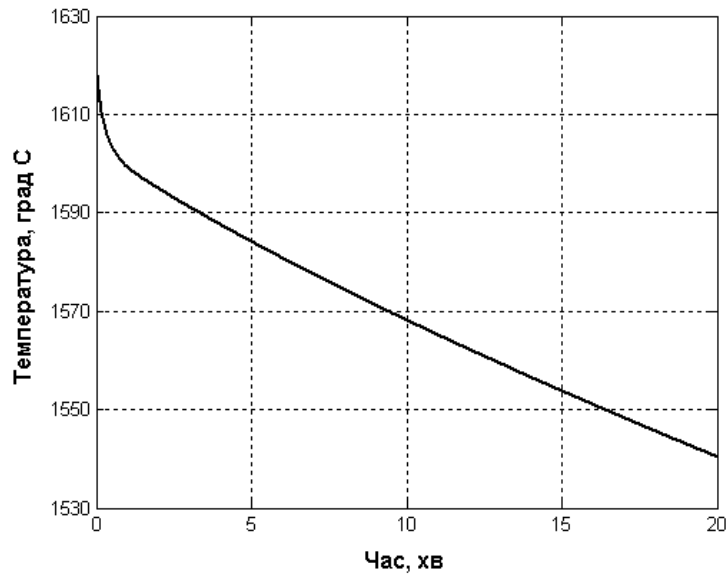
пература внутрішньої поверхні футеровки підготовленого ковша – 1173 К, температура довкілля для розрахунків прийнята рівною 293 К.



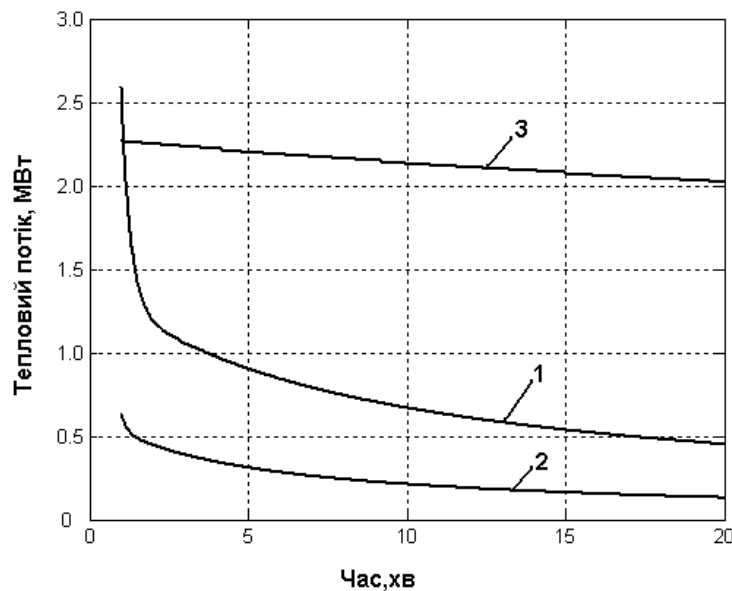
а - модель температури розплаву; б - модель теплового стану внутрішнього шару футеровки ковша; в - модель теплового потоку від поверхні розплаву

Рисунок 2 – Комп'ютерна модель теплового стану ковша:

На рис. 3,а подано результати моделювання для розплаву, що знаходиться у сталерозливному ковші протягом 20 хвилин. Просліджується майже лінійна залежність зниження температури розплаву від часу його знаходження у ковші. За час моделювання температура розплаву зменшується від початкового значення до 1814 К, тобто на 79 градусів. У табл. 1 наведено порівняння результатів моделювання охолодження розплаву у 120-тонному сталерозливному ковші з реальними даними. Середньоквадратичне відхилення дорівнює 3,7 градусів.



а)



б)

- а) процес охолодження розплаву в ковші;
 б) 1 - тепловий потік до стінки ковша; 2 - тепловий потік до днища ковша; 3 - тепловий потік від поверхні розплаву

Рисунок 3 – Результати, що одержано на моделі:

Таблиця 1 – Порівняння результатів моделювання охолодження з реальними даними

Час охолодження розплаву в ковші, хвил.	Моделльне зниження температури розплаву, град.	Реальне зниження температури розплаву, град.	Відхилення результатів моделювання, град.
15	65	68	3
16	68	69	1
17	71	73	2
18	73	78	5
19	76	73	3
20	79	75	4

Змінювання теплових потоків у шарах футеровки стінки та днища, а також теплового потоку з поверхні розплаву, зображено на рис. 3,б. Як видно з графіків, тепловий потік від розплаву через стінку ковша (крива 1) втричі більший чим потік від розплаву через днище (крива 2), але найбільшою втратою теплоти розплавом є променисто-конвективний потік з його поверхні (крива 3).

Висновки. Порівняння одержаних результатів моделювання з реальними даними охолодження розплаву дає можливість вважати розроблену модель адекватною та застосовною для дослідження теплового стану сталерозливних ковшів, а також для створення АСУ позапічної обробки сталі.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Огурцов, А. П.* Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и внепечные технологии [Текст] / А. П. Огурцов. – Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. – Т. 2. – 275 с. – Библиография в конце каждого раздела. – ISBN 978-966-00-1189-2.
2. *Свинолобов, Н. П.* Методы численного решения и математического моделирования процесса теплопроводности [Текст] / Н. П. Свинолобов, Ю. Я. Абраменков. – Днепропетровск : ДМетИ, 1974. – 77 с. – Библиогр. : с. 75.
3. *Бакакин, А. В.* Математическая модель тепловых процессов в ковше для прогноза температуры при внепечной обработке [Текст] / А. В. Бакакин, В. О. Хорошилов, Г. С. Гальперин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 4. – С. 143-147.
4. *Казачков, Е. А.* Исследование тепловых потерь в 350-т сталеразливочном ковше [Текст] / Е. А. Казачков, С. Г. Исайчикова // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2000. – № 9. – С. 27-33.
5. *Вихлевщук, В. А.* Ковшечная доводка стали [Текст] / В. А. Вихлевщук, В. С. Харахулах, С. С. Бродский. – Днепропетровск : Системные технологии, 2000. – 190 с. – Библиогр. : с. 171-187. – ISBN 966-7316-37-8.
6. *Бейцун, С. В.* Влияние начальных температур расплава и футеровки ковша на тепловые потери во время внепечной обработки стали [Текст] // С. В. Бейцун, А. В. Жаданос, Н. В. Михайловский // Металлургическая теплотехника : сб. научн. трудов НМетАУ. – Днепропетровск : НМетАУ, 2004. – С. 27-34.
7. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша [Текст] / С. В. Агеев, А. Д. Чернопольский, И. А. Петушков и др. // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 48-52.

Стаття надійшла до редакції 18.07.2013 р.
Рецензент, проф. О.Ю. Потап