

УДК 669.18

Разработка детерминированной математической модели процессов теплообмена при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей

Е.М. Запольская¹, А.В. Феоктистов¹, М.В. Темлянцева¹, В.В. Бухмиров², Е.Н. Бушуев²
¹ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

г. Новокузнецк, Российская Федерация

²ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При разогреве оксидноуглеродистых смолосвязанных футеровок сталеразливочных ковшей протекает ряд теплообменных и физико-химических процессов, взаимное влияние которых затрудняет разработку рациональных технологических режимов разогрева футеровки. Эта задача может быть успешно решена с применением детерминированных математических моделей. До настоящего времени было разработано достаточно много моделей разного уровня сложности, однако большинство из них имеют ряд существенных недостатков. Разработка и применение более совершенных комплексных детерминированных математических моделей, позволяющих исследовать тепловую работу стенов и футеровок на стадии разогрева и транспортирования расплава, являются эффективным и относительно малозатратным направлением теплотехнических исследований.

Материалы и методы: Использован метод математического моделирования теплообменных процессов на основе численного решения краевой задачи теории теплопроводности методом конечных разностей.

Результаты: Разработана комплексная детерминированная математическая модель тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. На основе анализа результатов многовариантных расчетов получены новые количественные данные о влиянии ряда факторов на тепловую эффективность работы стенов разогрева. Установлено, что для ковшей емкостью 90 т увеличение температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С при одновременном уменьшении величины зазора между крышкой и ковшом с 250 до 50 мм приводит к снижению удельного расхода условного топлива с 40,8 до 26,0 кг у.т./т транспортируемой стали, т.е. почти в 1,6 раза. Для ковшей емкостью 480 т аналогичные изменения температуры подогрева воздуха и зазора между крышкой стенов и ковшом приводят к снижению расхода топлива с 23,8 до 17,0 кг у.т./т транспортируемой стали, т.е. в 1,4 раза. Стенды для разогрева ковшей емкостью 90 т, по сравнению со стендами разогрева 480-тонных ковшей, имеют фактически в 1,5–1,6 раза больший удельный расход условного топлива и, следовательно, менее экономичны.

Выводы: Разработанная комплексная детерминированная математическая модель позволяет исследовать работу футеровок сталеразливочных ковшей на стадии их разогрева. Ее можно использовать для выполнения прогнозных и инженерных расчетов. Модель позволяет разрабатывать оптимальные температурные и тепловые режимы разогрева футеровок.

Ключевые слова: математическая модель, метод сеток, теплообмен в футеровке, углеродсодержащая футеровка, тепловая эффективность, сталеразливочный ковш.

Development of a deterministic mathematical model of heat and mass transfer processes at heating of linings in casting ladles

E.M. Zapolskaya¹, A.V. Feoktistov¹, M.V. Temlyantsev¹, V.V. Bukhmirov², E.N. Bushuyev²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Abstract

Background: Mutual influence of certain heat and mass transfer and physicochemical processes taking place in oxide-carbon resin-bound linings of casting ladles under heating hinders the development of rational technological modes of lining heating-up. This problem can be successfully solved using deterministic mathematical models. Most of the models of different complexity levels that have been developed so far have a number of significant drawbacks. Therefore, an effective and relatively low-cost direction of heat engineering research is development and application of more effective complex deterministic mathematical models that would allow us to study the thermal work of stands and linings at the stage of melt heating and transportation.

Materials and methods: We have used the method of mathematical modeling of heat and mass transfer processes based on the numerical solution to the boundary problem of the heat conductivity theory by the finite difference method.

Results: We have developed a complex deterministic mathematical model of thermal work of stands for heating of casting ladle linings. By analyzing the results of the multi-variant calculations, we have obtained new quantitative data on the effects of a number of factors on thermal efficiency of the heating stands. It has been established that for 90-ton buckets an increase in the air heating temperature from 10 to 400 °C while reducing the gap between the lid and the ladle from 250 to 50 mm results in a reduction in the specific fuel consumption from 40,8 to 26,0 kg in .t./t of transported steel, i.e. almost in 1,6 times. For buckets with a capacity of 480 tons, similar changes in the air heating temperature and the clearance between the stand cover and the bucket lead to a reduction in fuel consumption from 23,8 to 17,0 kgf.t./t of transported steel, i. E. in 1,4 times. Stands for heating buckets with a capacity of 90 tons in comparison with the heating booths of 480-ton buckets actually have a 1,5–1,6 times higher specific consumption of conventional fuel and, consequently, are less economical.

Conclusions: The developed complex deterministic mathematical model allows us to study the operation of casting ladle linings at the stage of their heating. It can be used for forecasting and engineering calculations. The model enables developing optimal temperature and heat modes of heating the linings.

Key words: mathematical model, net method, heat and mass transfer in lining, carbon-containing lining, heating efficiency, casting ladle.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.025-033

Введение. Практически вся выплавляемая в конвертерах, дуговых электросталеплавильных и мартеновских печах сталь проходит через сталеразливочные ковши. Наряду с традиционными операциями транспортирования и разливки жидкого металла в сталеразливочных ковшах проводят различные виды внепечной обработки стали [1, 2]. Перед заливкой жидкой стали сталеразливочные ковши подогревают до температуры 1100–1200 °C с помощью специальных установок, отапливаемых природным газом, или с помощью стенов электронагрева [2–6]. При разогреве углеродсодержащих футеровок в огнеупорах протекают процессы обезуглероживания, тесно связанные с температурным режимом разогрева [1–6]. Взаимное влияние тепло- и массообменных процессов осложняет разработку рациональных и оптимальных температурных и тепловых режимов разогрева футеровки. Для решения таких задач требуется учет множества взаимосвязанных явлений и процессов. Однако они могут быть эффективно решены с применением математического моделирования [7]. До настоящего времени учеными было разработано достаточно много моделей разного уровня сложности [8–11], но большинство из них имеют ряд существенных недостатков. Например, рассматриваемые модели позволяют моделировать только стационарные температурные поля или определять температурное поле только в однослойной футеровке.

В таких условиях разработка и применение комплексных детерминированных математических моделей, позволяющих исследовать тепловую работу футеровок на стадии их разогрева, а также транспортирования расплава, являются актуальным и эффективным направлением теплотехнических исследований.

Методы исследования. Для комплексного исследования тепловой работы

футеровок сталеразливочных ковшей разработана детерминированная математическая модель, имеющая блочную структуру. Модель имеет следующие основные (укрупненные) блоки:

1 – теплогенерация;

2 – внешний теплообмен во внутреннем пространстве ковша;

3 – внутренний теплообмен в футеровке;

4 – обезуглероживание футеровки;

5 – тепловой баланс.

На рис. 1 представлена расширенная информация о функциональном назначении блоков модели.

При разработке детерминированной модели ориентировались на комплексность в решении задачи. В связи с этим учитывали взаимное влияние на тепловое состояние футеровки разогрева ковша, транспортирования расплава и охлаждения футеровки.

Расчет полного горения газообразного топлива. Расчет полного горения газообразного топлива проводили по стандартной методике, представленной в [12].

Расчет внешнего теплообмена. При разогреве футеровки на стенде плотность q , Вт/м², теплового потока излучением и конвекцией от продуктов сгорания к поверхности огнеупоров рассчитывали по формуле [21]

$$q = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right) + \alpha_k (T_c - T_1), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты в системе газ–кладка; T_c и T_1 – температура среды и поверхности футеровки соответственно, К; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

В зависимости от целей, в которых используется модель, расчеты можно проводить принимая граничные условия I или III рода на внутренней поверхности футеровки.

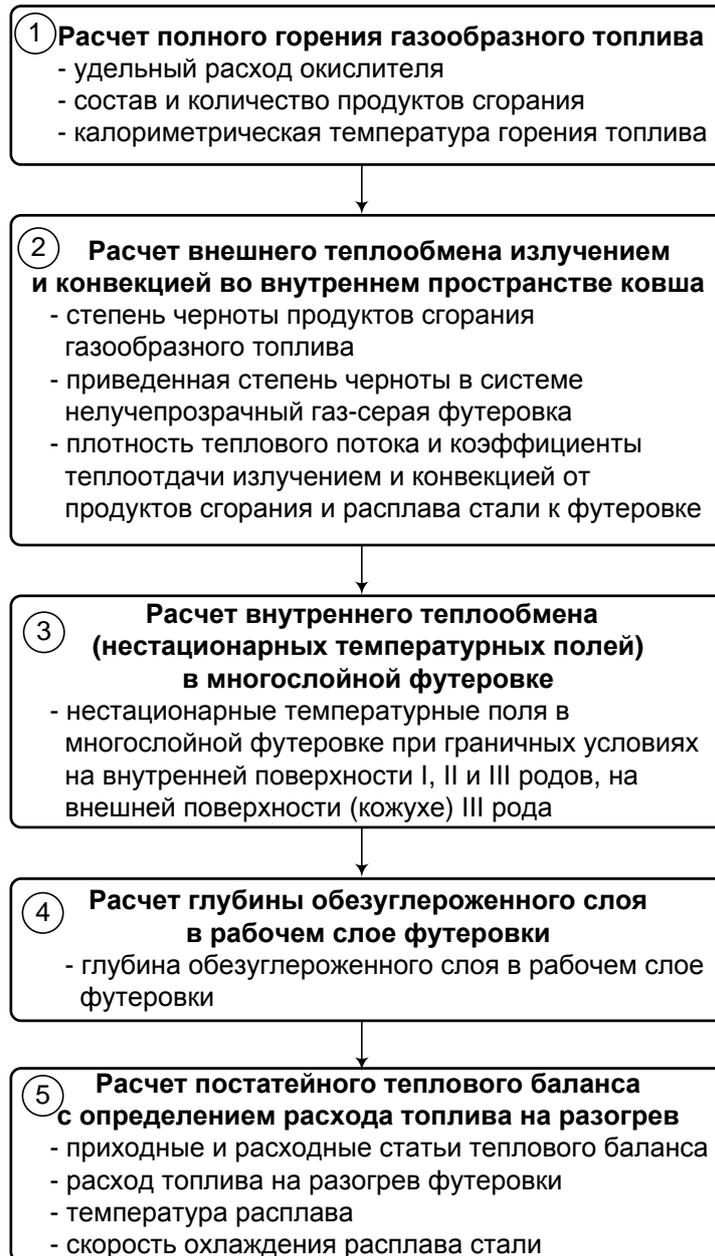


Рис. 1. Структура математической модели

При моделировании нелинейного закона изменения температуры поверхности футеровки t_i или среды t_c во времени использовали соотношение [12]

$$t = t_0 + A_1 \left(1 - \exp \left(-B_1 \frac{\tau_i}{\tau} \right) \right), \quad (2)$$

где t_0 – исходная температура поверхности или среды, °С; A_1 , B_1 – эмпирические коэффициенты, зависящие от режима нагрева; τ_i – текущий i -й момент времени от начала нагрева, мин; τ – общее время нагрева, мин.

Коэффициент конвективного теплообмена α_k от продуктов сгорания к огнеупорам в зависимости от конструктивных особенностей стенда и топливосжигающего устройства принимали в интервале от 30 до 80 Вт/(м²·К).

На внешней стороне кожуха футеровки ковша для всех вариантов расчета задавали граничное условие III рода. Коэффициент теплоотдачи от кожуха в окружающую среду определяли по соотношению [1, 13]

$$\alpha_c = 4,8 \cdot (t_k - t_{o,c})^{0,25}, \quad (3)$$

где t_k – температура кожуха ковша, °С; $t_{o,c}$ – температура окружающей среды, °С.

Расчет нагрева и охлаждения футеровки. В математической модели использован метод конечных разностей (МКР).

Для многослойной пластины, слои которой выполнены из различных материалов с переменными теплофизическими свойствами, численно было решено одномерное нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right), \quad (4)$$

где c – удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж/(г·К); t – температура, °С; ρ – плотность г/м³; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $0 \leq x \leq \delta$, δ – толщина футеровки, м.

В расчетах использовали футеровку, состоящую из рабочего и арматурного слоев, теплоизоляции и кожуха.

Расчет физико-химических процессов обезуглероживания футеровки. Глубину $\delta_{об}$ обезуглероженного слоя огнеупоров рассчитывали по закону квадратного корня

$$\delta_{об} = k\sqrt{\tau_b}, \quad (5)$$

где k – константа скорости обезуглероживания, мм/мин^{0,5}; τ_b – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

Константу k рассчитывали по уравнению Аррениуса

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (6)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от состава огнеупора и атмосферы, мм/мин^{0,5} [14–16], K ; T – температура слоя, К.

Поскольку уравнения (5) и (6) получены для расчета толщины обезуглероженного слоя при постоянной температуре поверхности огнеупора, непрерывную траекторию изменения температуры поверхности $t = f(t)$ заменяли отрезками продолжительностью Δt . На участке Δt температура огнеупора t равна средней температуре t_i^{cp} поверхности на i -м временном интервале. Соответственно, на каждом i -м временном интервале определяли прирост толщины обезуглероженного слоя $\delta_{об,i}$ [12].

Общую глубину обезуглероженного слоя за весь период нагрева определили по соотношению

$$\delta_{об} = \sum_{i=1}^n \Delta\delta_{об,i}. \quad (7)$$

Расчет теплового баланса. Тепловой баланс сталеразливочного ковша рассчитывали за текущий временной интервал (шаг по времени) и суммарный – за весь период разогрева [13]. Принимали, что в исходном состоянии футеровка просушена и ее влажность близка к нулю.

Приходные статьи определяли по следующим выражениям [13]:

1) химическое тепло топлива, кДж,

$$Q_m^x = 3600 \cdot B_m \cdot Q_n^p \Delta\tau, \quad (8)$$

где B_m – расход топлива, м³/ч; $\Delta\tau$ – временной интервал, с;

2) физическое тепло воздуха (в случае подогрева окислителя), кДж,

$$Q_b^\Phi = 3600 \cdot B_m \cdot L_n \cdot c_b \cdot t_b \Delta\tau; \quad (9)$$

3) физическое тепло газа (в случае подогрева газа), кДж,

$$Q_r^\Phi = 3600 \cdot B_m \cdot c_r \cdot t_r \Delta\tau; \quad (10)$$

4) тепло экзотермических реакций выгорания углерода из огнеупора, кДж,

$$Q_{об}^x = 339(C_n - C_k) \rho_p V_{об}, \quad (11)$$

где C_n и C_k – начальное и конечное (остаточное) содержание углерода в обезуглероженном слое огнеупора, % (по массе); ρ_p – плотность рабочего слоя огнеупора, кг/м³; $V_{об}$ – объем обезуглероженного слоя футеровки, м³.

Расходные статьи рассчитывали по известным формулам [13]:

1) тепло, аккумулируемое футеровкой $Q_{акк,ф}$, кДж (сумма тепла, аккумулированного рабочим $Q_{акк,р}$, арматурным $Q_{акк,а}$, теплоизоляционным $Q_{акк,т}$, слоями и кожухом $Q_{акк,к}$)

$$Q_{акк,ф} = Q_{акк,р} + Q_{акк,а} + Q_{акк,т} + Q_{акк,к}; \quad (12)$$

$$Q_{акк,р} = m_p(t_{p,р}^k c_p^k - t_{p,р}^h c_p^h); \quad (13)$$

$$Q_{акк,а} = m_a(t_{a,р}^k c_a^k - t_{a,р}^h c_a^h); \quad (14)$$

$$Q_{акк,т} = m_t(t_{t,р}^k c_t^k - t_{t,р}^h c_t^h); \quad (15)$$

$$Q_{акк,к} = m_k(t_{k,р}^k c_k^k - t_{k,р}^h c_k^h), \quad (16)$$

где m_p , m_a , m_t , m_k – масса слоев футеровки, кг; $t_{p,р}^k$, $t_{a,р}^k$, $t_{t,р}^k$, $t_{k,р}^k$ – средние конечные температуры слоев футеровки, °С; $t_{p,р}^h$, $t_{a,р}^h$, $t_{t,р}^h$, $t_{k,р}^h$ – средние начальные температуры слоев футеровки, °С; c_p^k , c_a^k , c_t^k , c_k^k – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей конечной средней температуре слоев, кДж/(кг·К); c_p^h , c_a^h , c_t^h , c_k^h – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей начальной средней температуре слоев, кДж/(кг·К);

2) потери тепла теплопроводностью в окружающую среду через футеровку и кожух ковша, кДж:

$$Q_r = 0,001 \cdot a_c(t_k - t_{o,c}) F_k \Delta\tau, \quad (17)$$

где F_k – площадь теплоотдающей поверхности (крышки, дна и стенок кожуха ковша), м²;

3) потери тепла с уходящими газами, кДж:

$$Q_d = 3600 \cdot B_t \cdot V_d \cdot t_{yx} \cdot c_{yx} \Delta\tau, \quad (18)$$

где t_{yx} и c_{yx} – температура и удельная объемная теплоемкость уходящих из полости ковша продуктов сгорания, °С и кДж/(м³·К);

4) потери тепла в результате химического недожога, кДж:

$$Q_{хн} = 3600 \cdot k_n \cdot B_t \cdot Q_n^p \Delta\tau, \quad (19)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий химический недожог, который для газообразного топлива обычно принимают не более 0,01–0,03, а в случае, если химический недожог отсутствует, то $k_n = 0$;

5) потери тепла с водой (в случае наличия водоохлаждаемых элементов), кДж:

$$Q_{вод} = G_{вод} \cdot c_{вод} \Delta t_{вод} \Delta\tau, \quad (20)$$

где $G_{\text{вод}}$ – расход воды, м³/с; $c_{\text{вод}}$ – удельная объемная теплоемкость воды, кДж/(м³·К); $\Delta t_{\text{вод}}$ – разность температур воды на входе и выходе из системы охлаждения, °С;

6) потери тепла излучением через зазор между крышкой стэнда и ковшом, кДж [12, 13]:

$$Q_{\text{изп}} = 0,001 \cdot \varepsilon_n C_0 \varphi \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right) F_n \Delta t, \quad (21)$$

где ε_n – коэффициент излучения проема; φ – коэффициент диафрагмирования, зависящий от высоты и глубины проема [13]; F_n – площадь проема, м²;

7) неучтенные тепловые потери (определяются как 10 % от суммы статей, которые не зависят от расхода топлива):

$$Q_n = 0,1 (Q_{\text{акк.ф}} + Q_T + Q_{\text{вод}}). \quad (22)$$

Суммы приходных и расходных статей приравнивали

$$Q_T^x + Q_B^{\Phi} + Q_T^{\Phi} + Q_{\text{об}}^x = Q_{\text{акк.ф}} + Q_T + Q_D + Q_{\text{ХН}} + Q_{\text{вод}} + Q_{\text{изп}} + Q_n. \quad (23)$$

Расход топлива, м³/ч рассчитывали по выражению

$$\begin{aligned} B_T = & [m_p (t_{p,\text{ср}}^k c_p^k - t_{p,\text{ср}}^h c_p^h) + m_a (t_{a,\text{ср}}^k c_a^k - t_{a,\text{ср}}^h c_a^h) + \\ & + m_T (t_{T,\text{ср}}^k c_T^k - t_{T,\text{ср}}^h c_T^h) + m_K (t_{K,\text{ср}}^k c_K^k - t_{K,\text{ср}}^h c_K^h) + \\ & + 0,001 \cdot a_c (t_k - t_{\text{о.с}}) F_K \Delta t + G_{\text{вод}} c_{\text{вод}} \Delta t_{\text{вод}} \Delta t + \\ & + 0,001 \cdot \varepsilon_n C_0 \varphi \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right) F_n \Delta t + \\ & + 0,1 (m_p (t_{p,\text{ср}}^k c_p^k - t_{p,\text{ср}}^h c_p^h) + m_a (t_{a,\text{ср}}^k c_a^k - t_{a,\text{ср}}^h c_a^h) + \\ & + m_T (t_{T,\text{ср}}^k c_T^k - t_{T,\text{ср}}^h c_T^h) + m_K (t_{K,\text{ср}}^k c_K^k - t_{K,\text{ср}}^h c_K^h) + \\ & + 0,001 \cdot a_c (t_k - t_{\text{о.с}}) F_K \Delta t + G_{\text{вод}} c_{\text{вод}} \Delta t_{\text{вод}} \Delta t + \\ & + 0,001 \cdot \varepsilon_n C_0 \varphi \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right) F_n \Delta t) - \\ & - 339 (C_n - C_k) \rho_p V_{\text{об}} / [3600 \cdot Q_n^p \Delta t + \\ & + 3600 \cdot L_n c_b t_b \Delta t + 3600 \cdot c_T t_T \Delta t - \\ & - 3600 \cdot V_d t_{yx} c_{yx} \Delta t - 3600 \cdot k_n Q_n^p \Delta t]. \end{aligned} \quad (24)$$

Адекватность математической модели проверена по результатам серии промышленных экспериментов на действующей стэндах разогрева сталеразливочных ковшей емкостью 130-т [14–17].

Для исследования влияния различных факторов на тепловую эффективность работы стэндов провели серию многовариантных расчетов. В расчетах принимали номинальную емкость E сталеразливочных ковшей равной 90, 130, 220, 350 и 480 т и соответствующие геометрические размеры, приведенные в табл. 1 [1].

Рабочий слой футеровки выполнен из алюмопериклазоуглеродистого ($C = 8 \%$) огнеупора; арматурный – из огнеупора марки МКРКП-45; теплоизоляционный слой – МКРКГ-400; броня ковша – из низколегированной стали. Между рабочим и арматурным слоями буферная засыпка марки ВГБМ-80 [19].

Стэнд отапливали природным газом следующего химического состава: 91,50 % CH₄; 3,07 % C₂H₆; 1,73 % C₃H₈; 0,90 % C₄H₁₀; 2,34 % N₂; 0,45 % CO₂; 0,01 % O₂. Коэффициент расхода окислителя (воздуха) – 1,1; температуры подогрева – 10, 200 и 400 °С. Между теплоизолированной крышкой и ковшом имеется кольцевой зазор высотой b 50, 150 и 250 мм. Разогрев осуществляется с постоянной, максимально допустимой по условиям трещинообразования скоростью роста температуры поверхности футеровки (для алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров 50–60 °С/ч). Время разогрева футеровки от 0 до 1200 °С – 24 ч.

Тепловую эффективность стэнда оценивали посредством коэффициента полезного действия и удельного расхода $B_{\text{уд}}$ условного топлива на тонну транспортируемой стали, который определяли по соотношению [18–20]

$$B_{\text{уд}} = \frac{Q_p^h}{29,3 (E - M_{\text{ш}})} \frac{B \tau}{V}, \quad (25)$$

где Q_p^h – теплота сгорания топлива (природного газа), МДж/м³; B – средний расход топлива за весь период разогрева, м³/ч.

Результаты исследования. В табл. 2 представлены результаты многовариантных расчетов для ковшей емкостью 90, 220 и 480 т. Установлено, что для ковшей емкостью 90 т при увеличении температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С и зазоре 50 мм КПД стэнда возрастает с 45,4 до 58,3 %, т.е. на 12,9 %, а при зазоре 250 мм – с 37,0 до 47,8 %, т.е. 10,8 %

Для большегрузных ковшей емкостью 480 т повышение температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С при зазоре 50 мм обеспечивает рост КПД стэнда с 51,5 до 66,1 %, т.е. на 14,6 %, а при зазоре 250 мм – с 47,4 до 61,0 %, т.е. 13,6 %

Повышение температуры подогрева воздуха с 10 до 400 °С для всех исследуемых вариантов сопровождается снижением удельного расхода топлива примерно в 1,3 раза.

По результатам теоретического исследования тепловой работы сталеразливочных ковшей при помощи математической модели можно сделать вывод о том, что стэнды для разогрева ковшей емкостью 90 т менее экономичны, по сравнению со стэндами разогрева ковшей емкостью 480 т, имеют фактически в 1,5–1,6 раза больший удельный расход условного топлива и меньший КПД.

Таблица 1. Геометрические размеры и конструкция футеровки сталеразливочных ковшей различной емкости

E , т	$M_{ш}$, т	D_1 , мм	D_2 , мм	h , мм	δ_1 , мм	δ_2 , мм	δ_3 , мм	δ_4 , мм
90	4,2	2767	3189	3180	150	100	10	20
220	6,0	3386	3950	4700	190	120	10	25
480	14,5	4615	5340	5660	250	150	10	40

Примечание: $M_{ш}$ – масса шлака; D_1 и D_2 – внутренний и наружный диаметры ковша; δ_1 , δ_2 , δ_3 и δ_4 – толщина рабочего, арматурного слоев, теплоизоляции и кожуха.

Таблица 2. Параметры и характеристики исследуемых режимов нагрева

E , т	b , м	$t_{подг}$, °С	$t_{п.кон}$, °С	$t_{р-а}$, °С	$t_{кож}$, °С	Q , м ³	B , м ³ /ч	$V_{уд}$, кг у.т./ т ст.	КПД, %
90	50	400	1195	1059	306	1747	72,8	26,0	58,3
	150	400				1914	79,8	28,4	53,2
	250	400				2129	88,7	31,7	47,8
	50	200				1980	82,5	29,5	51,4
	150	200				2172	90,5	32,3	46,9
	250	200				2419	100,8	36,0	42,1
	50	10				2244	93,5	33,4	45,4
	150	10				2464	102,7	36,6	41,3
	250	10				2749	114,5	40,8	37,0
220	50	400	1189	1001	287	3395	141,5	20,3	61,9
	150	400				3585	149,4	21,4	58,6
	250	400				3825	159,4	22,8	54,9
	50	200				3849	160,4	22,9	54,6
	150	200				4067	169,4	24,3	51,7
	250	200				4343	181,0	25,9	48,4
	50	10				4360	181,7	26,0	48,2
	150	10				4611	192,1	27,4	45,6
	250	10				4929	205,4	29,4	42,6
480	50	400	1183	906	198	6231	259,6	17,0	66,1
	150	400				6463	269,3	17,7	63,7
	250	400				6749	281,2	18,5	61,0
	50	200				7063	294,3	19,4	58,3
	150	200				7330	305,4	20,1	56,2
	250	200				7659	319,1	20,9	53,8
	50	10				8003	333,5	22,0	51,5
	150	10				8310	346,3	22,8	49,6
	250	10				8689	362,0	23,8	47,4

Примечание: $t_{подг}$, $t_{п.кон}$, $t_{р-а}$, $t_{кож}$ – температуры подогрева воздуха, поверхности футеровки в конце разогрева, на стыке рабочего и арматурного слоев, кожуха ковша.

Анализ взаимосвязи геометрических и тепловых параметров показывает, что для ковшей меньшей емкости характерны более высокие потери тепла теплопроводностью через кладку, достигающие для ковшей емкостью 90 т 6,5–8,8 %, а 480 т – 2,2–2,7 %, а также меньший расход тепла на аккумуляцию его футеровкой, который составляет 36,5–49,0 и 46,7–55,9 % соответственно [19]. Теплосодержание отдельных слоев и всей футеровки в целом для ковшей меньшей емкости выше по сравнению с ковшами большей емкости, поскольку температуры слоев и кожуха у первых выше, чем у вторых (табл. 2).

По причине меньшей толщины рабочего и арматурного слоев у ковшей малой емкости наблюдаются более высокая температура кожуха, в частности для ковшей емкостью 90, 220 и 480 т она составляет соответственно 306, 287 и 198 °С, и, как следствие, более высокие потери тепла теплопроводностью. При этом большое значение имеют

объем (масса) футеровки и площадь поверхности кожуха, определяющие потери тепла в окружающую среду [19].

На рис. 2 представлены зависимости удельных величин площади $S_{уд}$, м²/т, поверхности кожуха и объема $V_{уд}$, м³/т, от номинальной емкости ковша [19]. У ковшей емкостью 480 т удельная площадь, по сравнению с ковшами емкостью 90 т, почти в 2 раза меньше, а удельные объемы близки. Поэтому, если не учитывать тепловое состояние футеровок ковшей различной емкости, меньшие значения удельного расхода топлива для ковшей большей емкости можно объяснить меньшей удельной площадью поверхности кожуха. Таким образом, тепловая эффективность и экономичность стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей прямо пропорционально зависят от емкости сталеразливочных ковшей для всех интервалов значений температуры подо-

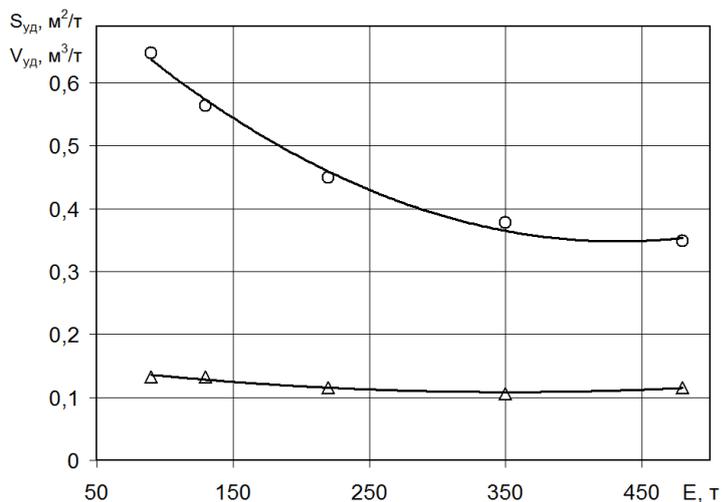


Рис. 2. Зависимости удельной площади поверхности кожуха (○) и объема (Δ) от емкости ковша

грева воздуха и величины зазоров между крышкой и ковшом [19].

Выводы. Разработанная комплексная детерминированная математическая модель позволяет исследовать работу футеровок сталеразливочных ковшей на стадии их разогрева. Ее применение является эффективным и относительно малозатратным методом теплотехнических испытаний. Созданная модель может использоваться для выполнения прогнозных и инженерных расчетов и позволяет разрабатывать оптимальные температурные и тепловые режимы разогрева футеровок. Выполненные исследования показали, что тепловая эффективность и экономичность стенов разогрева футеровок ковшей прямо пропорционально зависят от емкости сталеразливочных ковшей для всех интервалов значений температуры подогрева воздуха и величины зазора между крышкой и ковшом.

Список литературы

1. Стариков В.С., Темлянец М.В., Стариков В.В. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии. – М.: МИСиС, 2003. – 327 с.
2. Вихлевщук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С. Ковшевая доводка стали. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
3. Бершицкий И.М., Тарарышкин А.В. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей // *Сталь*. – 2010. – № 2. – С. 24–25.
4. Фирма «Марекко» на мировом рынке оборудования для сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей и желобов доменных печей / В. Лоренц, А. Локтев, В. Гартен, Д. Бехманн // *Новые огнеупоры*. – 2007. – № 12. – С. 19–27.
5. Современные установки для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей / Б.С. Чайкин, Г.Е. Марьянич, Е.М. Панов и др. // *Новые огнеупоры*. – 2006. – № 10. – С. 21–25.

6. Современные пути решения технологических и технических проблем сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей / В. Лоренц, А. Локтев, В. Гартен, Д. Бехманн // *Сталь*. – 2007. – № 11. – С. 74–77.

7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

8. Тепловая модель нагрева сталеразливочных ковшей / Х. Пфайфер, Ф. Фетт, Х. Шеффер и др. // *Черные металлы*. – 1985. – № 14. – С. 3–8.

9. Математическая модель тепловой работы сталеразливочного ковша / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, В.А. Коршунов и др. // *Изв. вузов Черная металлургия*. – 1991. – № 2. – С. 91–93.

10. Моделирование тепловой работы футеровки металлургических ковшей / В.С. Стариков, М.В. Темлянец, Е.Н. Темлянцева и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 10. – С. 55, 56.

11. Заболотский А.В. Модель разогрева футеровки сталеразливочного ковша // *Новые огнеупоры*. – 2010. – № 8. – С. 32–34.

12. Нагрев стальных слябов / В.Н. Перетятко, Н.В. Темлянец, М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.

13. Темлянец М.В., Темлянцева Е.Н. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства. – М.: Теплотехник, 2008. – 183 с.

14. Темлянец М.В., Матвеев М.В. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей // *Металлург*. – 2010. – № 8. – С. 60–62.

15. Темлянец М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2011. – № 10. – С. 32–36.

16. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров / Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, Е.М. Запольская и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2014. – Т. 57, № 12. – С. 24–28.

17. Анализ особенностей тепловой обработки периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей / М.В. Темлянец, М.В. Матвеев, К.Е. Костюченко, М.Ю. Лосицкая // *Вестник Российской академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение): сб. науч. тр.* – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2012. – Вып. 14. – С. 137–142.

18. Запольская Е.М., Темлянец М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // *Вестник Российской академии естественных наук (За-*

падно-Сибирское отделение). – 2013. – №15. – С. 128–134.

19. **Запольская Е.М., Темлянец М.В., Костюченко К.Е.** Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2 (4). – С. 28–32.

20. **Исследование** эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, К.Е. Костюченко, М.В. Матвеев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 3–7.

21. **Маковский В.А., Лаврентик И.И.** Алгоритмы управления нагревательными печами. – М.: Металлургия, 1977. – 183 с.

References

1. Starikov, V.S., Temlyantsev, M.V., Starikov, V.V. *Ogneupory i futerovki v kovshevoy metallurgii* [Refractories and linings in ladle metallurgy]. Moscow, MISiS, 2003. 327 p.

2. Vikhlevshchuk, V.A., Kharakhulakh, V.S., Brodsky, S.S. *Kovshevaya dovodka stali* [Steel ladle finishing]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2000. 190 p.

3. Bershitsky, I.M. Tararyshkin, A.V. Energoberegayushchie i ekologicheski bezopasnye ustanovki dlya elektricheskoy sushki i podogreva futerovki kovshey [Energy-saving and environmentally-friendly units for electric drying and heating of ladle lining]. *Stal'*, 2010, no. 2, pp. 24, 25.

4. Lorents, V., Loktev, A., Garten, V., Bekhmann, D. Firma «Mapeko» na mirovom rynke oborudovaniya dlya sushki, razogreva i termostatirovaniya metallurgicheskikh kovshey i zhelobov domennykh pechey [The «Mapeko» company on the world market of equipment for drying, heating and temperature control of metallurgic ladles and runners of blast furnaces]. *Novye ogneupory*, 2007, no. 12, pp. 19–27.

5. Chaikin, B.S., Maryanchik, G.E., Panov, E.M. Sovremennye ustanovki dlya sushki i vysokotemperaturnogo nagreva kovshey [Modern installations for drying and high temperature heating of ladles]. *Novye ogneupory*, 2006, no. 10, pp. 21–25.

6. Lorents, V., Loktev, A., Garten, V., Bekhmann, D. Sovremennye puti resheniya tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh problem sushki, razogreva i termostatirovaniya metallurgicheskikh kovshey [Modern solutions to technological and technical problems of drying, heating and temperature control of ladles]. *Stal'*, 2007, no. 11, pp. 74–77.

7. Arutyunov, V.A., Bukhmirov, V.V., Krupennikov, S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical modeling of thermal work of industrial furnaces]. Moscow, Metallurgiya, 1990. 239 p.

8. Pfaifer, Kh., Fett, F., Sheffer, Kh. Teplovaya model' nagreva stalerazlivochnykh kovshey [A thermal model of steel casting ladle heating]. *Chernye metally*, 1985, no. 14, pp. 3–8.

9. Shklyar, F.R., Malkin, V.M., Korshunov, V.A. Matematicheskaya model' teplovy raboty stalerazlivochnogo kovsha [A mathematical model of thermal work of the casting ladle]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1991, no. 2, pp. 91–93.

10. Starikov, V.S., Temlyantsev, M.V., Temlyantseva, E.N. Modelirovanie teplovy raboty futerovki metallurgicheskikh kovshey [Modelling of thermal work of metallurgic ladle linings]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2002, no. 10, pp. 55, 56.

11. Zabolotsky, A.V. Model' razogreva futerovki stalerazlivochnogo kovsha [A model of the casting ladle lining heating]. *Novye ogneupory*, 2010, no. 8, pp. 32–34.

12. Peretyatko, V.N., Temlyantsev, N.V., Temlyantsev, M.V., Mikhailenko, Yu.E. *Nagrev stal'nykh slyabov* [Heating of steel slabs]. Moscow, Teplotekhnika, 2008. 192 p.

13. Temlyantsev, M.V., Temlyantseva, E.N. *Ogneupory i futerovki plavil'nykh i liteynykh agregatov alyuminiyevogo proizvodstva* [Refractories and linings of steel melting and casting units in aluminium production]. Moscow, Teplotekhnika, 2008. 183 p.

14. Temlyantsev, M.V., Matveyev, M.V. Obezuglerozhivanie periklazouglerodistykh ogneuporov pri teplovy obrabotke futerovok stalerazlivochnykh kovshey [Decarbonization of periclase-carbonaceous refractories under heat treatment of casting ladle linings]. *Metallurg*, 2010, no. 8, pp. 60–62.

15. Temlyantsev, M.V., Matveyev, M.V., Temlyantseva, E.N. Issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov na obezuglerozhivanie periklazouglerodistykh kovshovykh ogneuporov [Studying the effects of different factors on decarbonization of periclase-carbonaceous ladle refractories]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2011, no. 10, pp. 32–36.

16. Protopopov, E.V., Temlyantsev, M.V., Zapolskaya, E.M., Maksakova, K.E., Degtyar, V.A. Issledovanie vysokotemperaturnogo obezuglerozhivaniya alyumoperiklazouglerodistykh kovshevykh ogneuporov [Studying of high temperature decarbonization of alumina-periclase-carbonaceous ladle refractories]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 24–28.

17. Temlyantsev, M.V., Matveyev, M.V., Kostyuchenko, K.E., Lositskaya, M.Yu. Analiz osobennostey teplovy obrabotki periklazouglerodistykh i alyumoperiklazouglerodistykh futerovok stalerazlivochnykh kovshey [Analysis of the heat treatment parameters of periclase-carbonaceous and alumina-periclase-carbonaceous linings of casting ladles]. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk (Zapadno-Sibirskoe otdelenie)*, Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 2012, issue 14, pp. 137–142.

18. Zapolskaya, E.M., Temlyantsev, M.V., Kostyuchenko, K.E. Analiz osnovnykh napravleniy povysheniya energotekhnologicheskoy effektivnosti stendov vysokotemperaturnogo razogreva futerovok stalerazlivochnykh kovshey [Analysis of the main directions of improving the energy and technological efficiency of high temperature heating stands of casting ladle linings]. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk (Zapadno-Sibirskoe otdelenie)*, 2013, no. 15, pp. 128–134.

19. Zapolskaya, E.M., Temlyantsev, M.V., Kostyuchenko, K.E. Vliyaniye geometricheskikh razmerov i emkosti stalerazlivochnykh kovshey na teplovuyu effektivnost' stendov vysokotemperaturnogo razogreva [Influence of the geometrical dimensions and capacity of casting ladles on the thermal efficiency of high temperature heating stands]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2013, no. 2(4), pp. 28–32.

20. Zapolskaya, E.M., Temlyantsev, M.V., Kostyuchenko, K.E., Matveyev, M.V. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya kisloroda pri otoplenii stendov vysoko-temperaturnogo razogreva futerovok stalerazlivochnykh kovshey [Studying of the efficiency of using oxygen in heating high temperature stands of casting ladle linings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedeniy. Chernaya metallurgiya, 2013, no. 6, pp. 3–7.

21. Makovskiy, V.A., Lavrentik, I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [Algorithms of heating furnace control]. Moscow, Metallurgiya, 1977. 183 p.

Запольская Екатерина Михайловна,
ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
редактор,
e-mail: beloglazova-ekat@mail.ru
Zapolskaya Ekaterina Mikhailovna,
Siberian State Industrial University,
editor,
e-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

Феоктистов Андрей Владимирович,
ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, проректор по учебной работе – первый проректор,
телефон (3843) 46-57-92,
e-mail: umu@sibsiu.ru
Feoktistov Andrei Vladimirovich,
Siberian State Industrial University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Department of Heat Power Engineering and Ecology, Vice-Rector for Academics – First Vice-Rector,
telephone (3843) 46-57-92,
e-mail: umu@sibsiu.ru

Темлянец Михаил Викторович,
ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, проректор по научной работе и инновациям,
телефон (3843) 46-58-83,
e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
Temlyantsev Mikhail Viktorovich,
Siberian State Industrial University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Department of Heat Power Engineering and Ecology, Vice-Rector for Research and Innovations,
telephone (3843) 46-58-83,
e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Бухмиров Вячеслав Викторович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники,
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru
Bukhmirov Vyacheslav Viktorovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Head of the Theory of Heat Engineering Department,
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Бушуев Евгений Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике,
e-mail: bushuevEN@mail.ru
Bushuev Evgeny Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering,
e-mail: bushuevEN@mail.ru