

5. Гличев А.В. Основы управления качеством продукции. М.: РИА «Стандарты и качество», 2001. 424 с.

Ким Елена Викторовна. асп., [deva7181@mail.ru](mailto:deva7181@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет

*PROVIDING INNOVATIVE TECHNOLOGIES  
THE PRODUCTION OF QUALITY PRODUCTS*

*E.V. Kim*

*Aspects of providing innovative technologies for the production of qualitative products, the stages of quality control, the application of statistical methods of quality control in the provision of innovative technologies for the production of quality products, methodology of the Quality Function Deployment QFD are considered.*

*Key words: aspects of security, stages of control, statistical methods, quality control, provision of innovative technologies, methodology of QFD.*

*Kim Elena Viktorovna, postgraduate, [deva7181@mail.ru](mailto:deva7181@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 62.229.74:621.9

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
МЕЖДУ РАСПЛАВОМ МЕТАЛЛА И ОГНЕУПОРНЫМ  
КОМПЛЕКТОМ В ШИБЕРНОМ ЗАТВОРЕ**

Д.И. Жилин

*Рассмотрена усовершенствованная конструкция шиберного затвора литейного ковша. Приведены математическая модель процесса нестационарного теплообмена между расплавом металла и огнеупорным комплектом в шиберном затворе с дополнительным подогревом ковшевого стакана, а также результаты аналитического расчёта.*

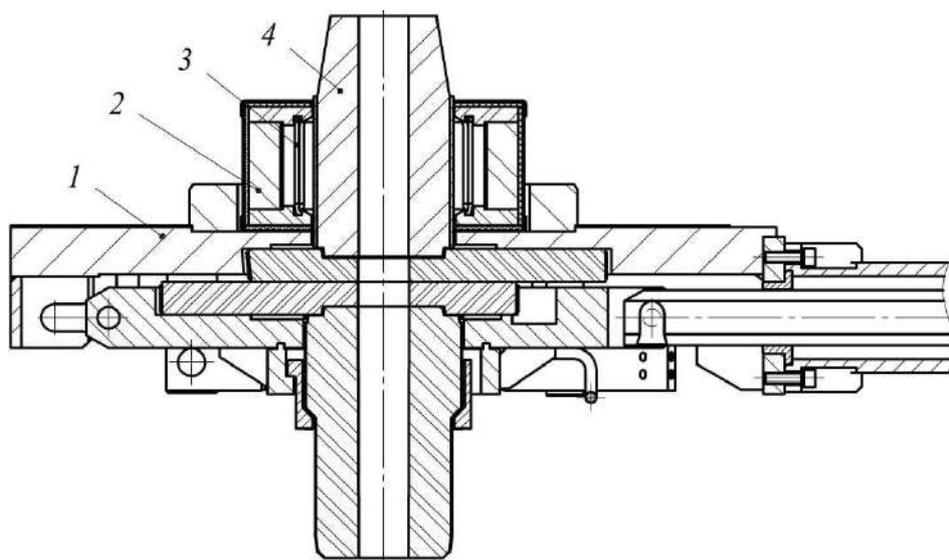
*Ключевые слова: шиберный затвор, огнеупорный комплект, теплообмен, расплав металла, математическая модель, аналитический расчёт.*

При всём многообразии сталеразливочных систем современные методы разлива металла находят всё большее применение на металлургических заводах, специализирующихся на разливе стали [1-3], в то время как литейные предприятия, в том числе при разливе цветных металлов, практически не ощущают на себе процессы, связанные с совершенствованием существующих методов разлива. Известные конструкции шиберных затворов для металлургических производств не могут полноценно быть использованы при эксплуатации в условиях литейных производств.

Основной причиной является то, что их конструкции не адаптированы к особенностям технологических процессов литья, в том числе не могут обеспечивать беспрепятственное истечение металла из ковша после его перемещений между разливочными формами вследствие быстрой кристаллизации металла (порядка 10 с), находящегося в разливочном канале шибберного затвора при его перекрытии. В среднем время перемещений ковшей между формами варьируется от 10 до 90 с, поэтому основной задачей при совершенствовании шибберного затвора является обеспечение гарантированного отсутствия кристаллизации металла, находящегося в разливочном канале, на протяжении 90 с.

Решением задачи предотвращения застывания металла, находящегося в разливочном канале при его перекрытии, может быть внедрение в конструкцию шибберного затвора 1 специального блока 2, в котором располагается нагревательный элемент с организованной системой подвода тепла 3 через ковшевой стакан 4 к проблемной зоне разливочного канала (рис. 1).

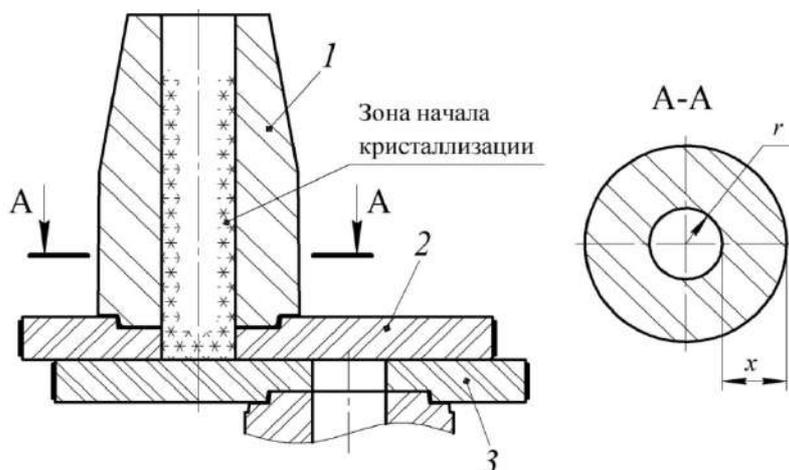
Наиболее целесообразно размещать нагревательный элемент снаружи ковшевого стакана, что позволит обеспечить равномерный подогрев всей зоны разливочного канала и компенсировать потери тепла от расплава. В качестве материала нагревательного элемента может быть использован молибден, вольфрам и другие металлы с высокой температурой плавления.



**Рис. 1. Схема усовершенствованной конструкции шибберного затвора литейного ковша**

Из-за отсутствия известных закономерностей протекания рассматриваемого процесса необходимо разработать математическую модель, описывающую нестационарное распределение тепла в расплаве и в стенке канала при осуществлении дополнительного подогрева разливочного канала.

На рис. 2 представлена схема элементов огнеупорного комплекта с радиусом разливочного канала  $r$  и толщиной стенки ковшевого стакана  $x$ , участвующих в процессе теплообмена.



**Рис. 2. Схема элементов огнеупорного комплекта, участвующих в процессе теплообмена: 1 – ковшевой стакан; 2 – неподвижная шибберная плита; 3 – подвижная шибберная плита**

Как правило, толщина стенки ковшевого стакана  $x$  принимается в пределах 40...60 мм, диаметры разливочного канала  $D$ , наиболее часто используемые при разливке металлов в литейном производстве, варьируются от 40 до 100 мм.

Также на рис. 2 указана зона начала кристаллизации металла на границе «жидкий металл – огнеупорный элемент».

При построении модели приняты следующие гипотезы и предположения:

- теплообмен происходит только через боковые стенки канала, а геометрическая модель основана на выражениях для бесконечного цилиндра;

- конвекцией в расплаве можно пренебречь ввиду малого объема внутренней части расплава и небольшого рассматриваемого отрезка времени;

- наиболее важным для рассмотрения представляется поле распределения температуры в расплаве, при этом переходные процессы на малых временных интервалах в стенке канала у внутренней поверхности несущественны;

- предполагается, что расплав остывает неравномерно и имеет максимальное значение температуры вблизи оси симметрии конструкции;

- передача тепла также происходит через неподвижную и подвижную плиты шибберного затвора (процесс может быть рассмотрен в виде отдельной подзадачи о нестационарном распространении тепла через бесконечную пластину).

Таким образом, достаточным будет рассматривать распределение температуры расплава в радиальном направлении и по толщине стенки канала. Для отыскания температурного поля воспользуемся уравнением теплопроводности в декартовых координатах. В общем виде оно имеет следующий вид:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + q_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость материала;  $T(x, y, z, \tau)$  – функция распределения температуры;  $\tau$  – время, с;  $\lambda(x, y, z, \tau)$  – заданная функция;  $q_{\text{в}}$  – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>.

Упростим уравнение (1), предположив, что  $\lambda = \text{const}$ , а тепловое поле в стенке будем рассматривать от внутренней поверхности к внешней поверхности, т.е. одномерный случай. Опытным путем установлено, что коэффициент пропорциональности  $\lambda$  [Вт/м·К] в уравнении (1) представляет собой физический параметр вещества, характеризующий способность вещества проводить теплоту, и называется коэффициентом теплопроводности. Учитывая высокую степень нагрева исследуемых элементов огнеупорного комплекта, можно использовать значение  $\lambda$  для соответствующего диапазона температур из справочной литературы.

На основании принятых предположений выражение (1) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\rho c_p}. \quad (2)$$

Здесь  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

В данном случае система не имеет внутренних источников тепла – нагрев на внутренней поверхности стенки оболочки  $T_3$  рассматриваем как внешнее приложение источника тепла к стенке. В итоге получим частный случай дифференциального уравнения теплопроводности для цилиндрической задачи

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \quad (3)$$

Приведем уравнение (3) к безразмерному виду для случая распределения тепла в цилиндре

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), \quad (4)$$

где  $\theta = \frac{T - T_1}{T_0 - T_1}$  – безразмерная температура;  $R = \frac{r}{r_0}$  – безразмерная

координата;  $Bi = \frac{\alpha \delta_0}{\lambda}$  – число Био;  $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$  – безразмерное время (число Фурье).

Граничные условия:

$$\left. \begin{array}{l} \text{на оси при } R=0 \quad \frac{d\theta}{dR} = 0 \quad (Fo > 0) \\ \text{на поверхности при } R=1 \quad \frac{d\theta}{dR} = Bi\theta \quad (Fo > 0) \end{array} \right\} \quad (5)$$

Уравнение теплопроводности (4) является дифференциальным уравнением с частными производными. В данном случае решение находится с привлечением начальных и граничных условий (5), которым должна удовлетворять искомая функция  $T(x, y, z, \tau)$ .

Для данного случая с учетом граничных условий (5) решение (3) или (4) необходимо искать для цилиндра бесконечной длины, т.е. без учета влияния теплообмена на его торцах. Таким образом, решая задачу методом Фурье, получаем выражение, описывающее распределение безразмерной температуры в цилиндре радиусом  $r_0$  для безграничной длины

$$\Theta = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0(\mu_n R) e^{-\mu_n^2 Fo} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \Theta_n, \quad (6)$$

где  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения;  $J_0(\mu_n)$  и  $J_1(\mu_n)$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Корни  $\mu_n$  являются корнями характеристического уравнения

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi},$$

где  $J_1(\mu)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка, причем

$$J_1'(x) = -J_1(x).$$

Многочисленные исследования показали, что при  $Fo \geq 0,25$  ряд достаточно точно описывается первым членом ряда, тогда

$$\Theta = D_1 J_0(\mu_1 R) \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (8)$$

где  $D_1$  вычисляется по формуле  $D_1 \frac{2J_1(\mu_1)}{\mu_1 (J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1))}$ .

Таким образом, определяется тепловое поле цилиндра (стенки ковшового стакана):

- при  $Fo < 0,25$  описывается выражением (6) с использованием не менее 3 членов ряда;

- при  $F_0 \geq 0,25$  описывается выражением (7).

Расчёт нестационарного теплообмена проводился для расплава металла и элементов огнеупорного комплекта, имеющих корундсодержащий состав. В качестве расплавленного металла был взят расплав латуни Л80 как наиболее применяемой марки на предприятиях цветного литья и имеющий высокую температуру плавления. Так как в дальнейшем расчёт нестационарного теплообмена будет проводиться с использованием устройства дополнительного подогрева ковшевого стакана, то при проведении дальнейших расчётов из всех элементов огнеупорного комплекта, участвующих в процессе теплопередачи, целесообразно рассматривать только ковшевой стакан.

По предварительным проектировочным расчетам устройства дополнительного подогрева ковшевого стакана и выбранным источникам питания, которые оптимально могут быть использованы на участке разлива металла литейного цеха, установлено, что номинальная температура нагревательного элемента составит  $1400^{\circ}\text{C}$ . В связи с этим необходимо провести аналитическое исследование влияния дополнительного источника тепла, установленного снаружи ковшевого стакана, на процесс теплопередачи между расплавом металла и ковшевым стаканом при перекрытии разливочного канала, используя разработанную математическую модель.

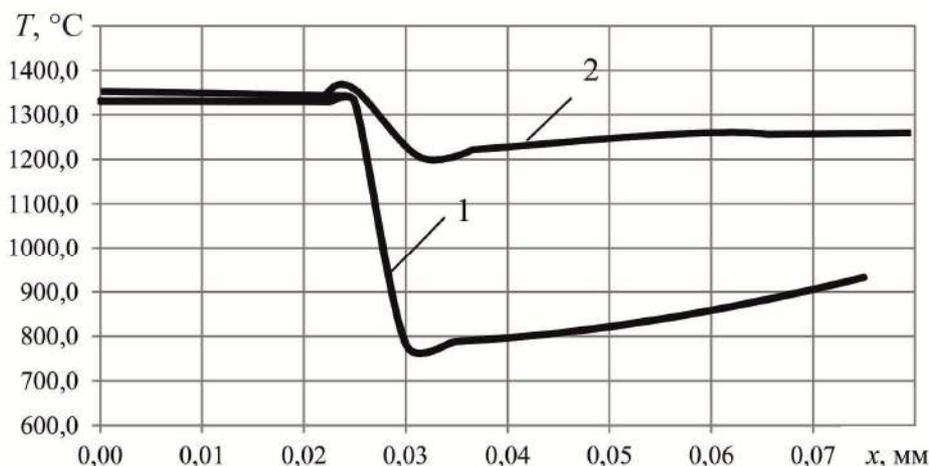
При моделировании используем исходные данные таблицы, диаметр разливочного канала принимаем 100 мм.

**Результаты промежуточных вычислений, необходимых при расчёте распределения тепла в ковшевом стакане с дополнительным подогревом**

Коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$a$	$3,49 \cdot 10^6$
Число Фурье	$Fo$	2,5
Число Био	$Bi$	0,6
Коэффициенты характеристического уравнения	$\mu_1$	1,02
	$\mu_2$	3,98
	$\mu_3$	7,1

Поскольку  $F_0 \geq 0,25$ , то тепловое поле стенки ковшевого стакана описывается выражением (7).

В результате получены значения нестационарного распределения температуры в ковшевом стакане с дополнительным подогревом (по толщине стакана) через заданные промежутки времени. С использованием результатов, построены графики распределения температуры в ковшевом стакане при различном времени его дополнительного подогрева (рис. 3).



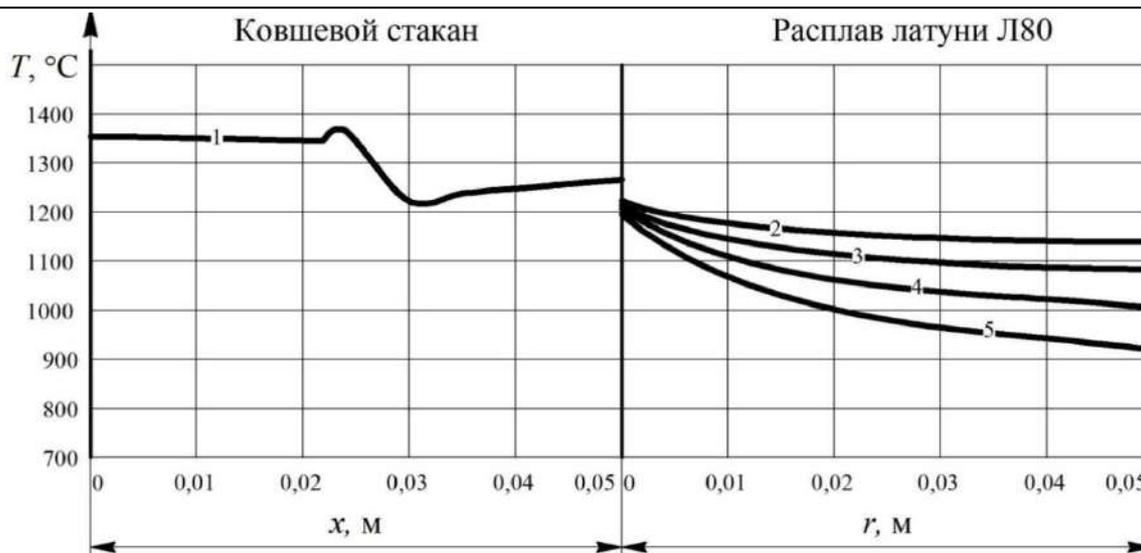
**Рис. 3. Распределение температуры в ковшевом стакане с дополнительным подогревом через заданный промежуток времени  $\tau$ : 1 – через 600 с; 2 – через 1800 с**

Из графиков рис. 3 видно, что использование дополнительного подогрева ковшевого стакана обеспечивает достаточный подвод тепла к столбу жидкого металла только в случае продолжительного предварительного прогрева ковшевого стакана, так как огнеупорный материал стакана обладает низкой теплопроводностью.

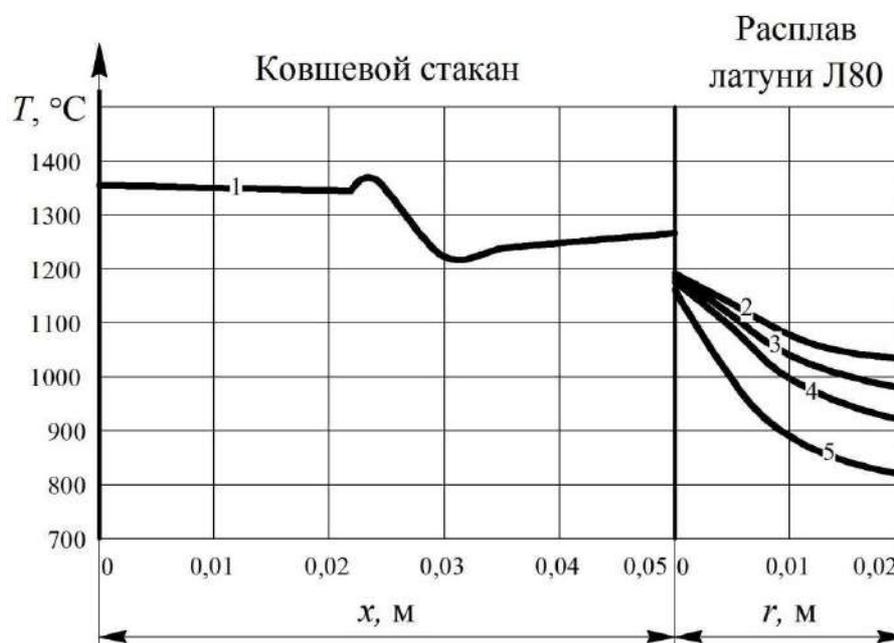
Моделирование нестационарного теплообмена между расплавом металла и огнеупорным ковшевым стаканом показало необходимость предварительного разогрева ковшевого стакана перед перекрытием разливочного канала, что подтверждается графиками (см. рис. 3).

На графике (см. рис. 3,) показано, что за 600 с (10 мин) температура на границе расплава и ковшевого стакана при его дополнительном подогреве ковшевого стакана не превышает 1000 °С, что может быть недостаточным для поддержания металла, находящегося в канале, в расплавленном состоянии. Через 1800 с (30 мин) после начала разогрева стакана температура на границе расплава и ковшевого стакана будет близка к температуре, создаваемой нагревательным элементом.

Воспользовавшись полученными выражениями (6) и (7), можно определить нестационарное распределение тепла в столбе жидкого металла и оценить влияние дополнительного подогрева на его температурное состояние. При расчёте нестационарного распределения тепла в столбе жидкого металла при условии его дополнительного подогрева, в качестве значения внешней приложенной температуры принимается значение температуры прогретой внутренней стенки ковшевого стакана. На рис. 4 и 5 представлены графики распределения температуры в теле ковшевого стакана после предварительного прогрева в течение 1800 с (кривая 1) и графики изменения температуры столба металла  $\varnothing$  100 мм и  $\varnothing$  40 мм через 10, 30, 60 и 90 с.



**Рис. 4. Графики распределения температуры по толщине стенки стакана и в столбе металла  $\varnothing 100$  мм при различном времени перекрытия канала: 1 – график изменения температуры по толщине стенки стакана после предварительного прогрева в течение 1800 с; 2,3,4,5 – графики изменения температуры столба латуни Л80 соответственно через 10, 30, 60 и 90 с**



**Рис. 5. Графики распределения температуры по толщине стенки стакана и в столбе металла  $\varnothing 40$  мм при различном времени перекрытия канала: 1 – график изменения температуры по толщине стенки стакана после предварительного прогрева в течение 1800 с; 2,3,4,5 – графики изменения температуры столба латуни Л80 соответственно через 10, 30, 60 и 90 с**

Из графиков, представленных на рис. 4 и 5, видно, что за время перекрытия канала от 10 до 90 с температура внутренней стенки ковшевого стакана изменяется незначительно, поэтому кривая 1 за рассматриваемые интервалы времени остается практически неизменной.

При увеличении диаметра разливочного канала температура столба металла остается более высокой, что гарантирует отсутствие кристаллизации металла, находящегося в разливочном канале в течение 90 с.

Используя предложенную математическую модель процесса нестационарного теплообмена между расплавом металла и огнеупорным комплектом в шиберном затворе с дополнительным подогревом ковшевого стакана, можно прогнозировать температурное состояние столба жидкого металла при различных сочетаниях геометрических параметров ковшевого стакана и проводить оценку гарантированного времени перекрытия разливочного отверстия без возникновения кристаллизации металла в нём.

### Список литературы

1. Отечественные системы разливки стали и огнеупорные комплекты производства НПП «Вулкан-ТМ» / В.И. Золотухин, А.Г. Головкин, Е.И. Гордеев, Д.А. Провоторов, Н.А. Гордеева // Новые огнеупоры. 2015. №10. С.13-17.
2. State-of-the-Art Out-of-Furnace Steel Making and Steel Casting Solutions by SME Vulkan-TM / D.A. Provotorov, V.I. Zolotukhin, V.V. Preys, I.A. Plyichev, K.V. Zvyagin // Proceedings of abstract 2<sup>nd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, May 15th - 17th 2013. Brno, Czech Republic. P. 165-168.
3. Золотухин В.И. Автоматизация процессов дозирования и повышения непрерывности работы МНЛЗ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 5. С. 12-15.
4. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И. Задачник по теплообмену: учеб. пособие. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Издательский Дом МЭИ, 2008. 196 с.
5. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Теплообмен: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Издательский Дом МЭИ, 2005. 550 с.
6. Видин Ю.В., Колосов В.В. Теоретические основы теплотехники. Теплообмен: учеб. пособие. 3-е изд., испр. и доп. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 174 с.

*Жилин Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор, [Zhilin@vulkantm.com](mailto:Zhilin@vulkantm.com), Россия, Тула, ООО «НПП «Вулкан-ТМ»*

**MATHEMATICAL MODEL AND THEORETICAL STUDY  
OF NON-STATIONARY HEAT EXCHANGE BETWEEN FUSION OF METAL  
AND REFRACTORIES IN THE SLIDE GATE**

*D.I. Zhilin*

*The improved design of the slide gate is considered. A mathematical model and theoretical study of non-stationary heat exchange between fusion of metal and refractories in the slide gate with additional heating of a ladle nozzle are given.*

*Key words: slide gate, refractories, non-stationary heat exchange, mathematical model, theoretical study*

*Zhilin Dmitriy Igorevich, Design-Engineer, [Zhilin@vulkantm.com](mailto:Zhilin@vulkantm.com), Russia, Tula, LLC «SPP «Vulkan-TM»*

УДК 631.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНОГО  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ  
НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА  
НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СВЕРНУТЫХ ВТУЛОК  
ИЗ Бр ОЦС 4-4-2,5**

А.В. Морозов, Л.В. Федорова, Г.Д. Федотов, Е.А. Токмаков

*Рассмотрено применение объемного электромеханического дорнования (ОЭМД) к свернутым втулкам из бронзы БрОЦС 4-4-2,5. Проведен рентгеноструктурный анализ обработанной поверхности втулок, изготовленных из данной марки бронзы. Определено влияние режимов ОЭМД на формирование элементного состава на обработанной поверхности.*

*Ключевые слова: бронзовые свернутые втулки, объемное электромеханическое дорнование, поверхность, свинец.*

Задача повышения эксплуатационной надежности деталей машин приобретает все большее значение в связи с увеличением механической и тепловой напряженности узлов трения. Подшипники скольжения с мягкими вкладышами, широко распространенные в технике, работают в условиях граничной смазки. Даже подшипники скольжения, предназначенные для работы в режиме жидкостного трения, работают в условиях ограниченной смазки во время пуска и остановки машины. В связи с этим изнашивание подшипников скольжения, работающих в условиях внешнего трения, определяется совместимостью контактирующих материалов.