

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ РАСПЛАВА И ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

*Швыдкий В.С., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

*Спириин Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)*

*Лавров В.В., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

*Носков В.Ю., старший преподаватель кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Сформулирована задача нестационарного теплообмена в зоне расплава доменной печи, учитывающая особенности процесса фильтрации чугуна и шлака через коксовую насадку. Общая закономерность заключается в аperiodическом (не колебательном) характере переходных процессов теплообмена в слое. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. Показано, что аperiodический (неколебательный) переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если возмущение оказывает одинаковое по знаку воздействие на нижнюю и верхнюю ступени теплообмена, а колебательный – если оно оказывает противоположное влияние на эти зоны теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

**Ключевые слова:** доменный процесс, теплообмен, зона расплава, математическое моделирование, переходные процессы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-672-676

Технология выплавки чугуна в доменных печах является наиболее сложной. Эффективность этой технологии во многом определяется знаниями закономерностей развития тепловых и физико-химических явлений по высоте печи, уровень которых позволяет непрерывно совершенствовать приемы управления аэродинамическим и тепловым режимами доменной плавки. В последнее время исследователями разных стран много внимания уделялось изучению состояния температурных полей, полей скоростей, концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  по высоте печи [1, 2]. Благодаря результатам этих исследований удалось получить новые или уточнить существующие знания о протекании взаимосвязанных между собой тепловых, физико-химических процессов, а также процессов движения газов и материалов. Важно отметить, что эти исследования относились к изучению стационарных состояний процесса доменной плавки, когда все ее параметры не изменялись во времени.

В реальных условиях работы доменной печи любое изменение параметров плавки – рудной нагрузки, состава дутья, его температуры, влажности и других является нарушением (возмущением) стационарного состояния, в результате чего возникает переходный процесс к новому стационарному состоянию. Переходные процессы в доменных печах, связанные с перестройкой темпера-

турных и концентрационных полей, полей давления и скоростей газа, носят нестационарный характер.

Наибольшее влияние на уровень устойчивости режимов работы доменной печи оказывают переходные процессы, определяющие тепловое состояние, особенно в высокотемпературной зоне (в области заплечиков и горна), зоне, где формируются продукты плавки, их качественные и количественные характеристики, определяющие технико-экономические показатели технологии производства чугуна.

В зависимости от вида и знака возмущения, например, нарушающего тепловое состояние горна, возможны либо его разогрев, либо его похолодание. Если возникли возмущения по нескольким параметрам, то протекание переходных процессов существенно усложняется. Опытные представления о характере и продолжительности переходных процессов не раскрывают всей картины перестройки полей главных параметров доменной плавки. Подобная ограниченность может быть устранена изучением переходных процессов в доменной печи методами математического моделирования [3 – 6].

Для исследования закономерностей перестройки температурных полей в зоне расплава, необходимо было получить представления об изменении температур кокса, чугуна, шлака на различных горизонтах по

высоте зоны расплава. При постановке задачи нестационарного теплообмена в нижней части доменной печи за основу была принята схема движения материалов и газов, представленная в работах [6 – 9]. В соответствии с принятой схемой в зоне расплава происходит нагрев газом трех составляющих шихты – кокса, чугуна и шлака, причем каждая из них, в свою очередь, пребывает в состоянии теплообмена между собой. В этой зоне развиты как конвективные процессы теплообмена, так и процессы лучистого теплообмена (тепловое излучение). Конвективный теплообмен имеет место между газом и коксом, газом и чугуном, газом и шлаком, а также между шлаком и коксом, поскольку стекающий по коксу шлак частично покрывает его поверхность, а лучистый теплообмен происходит между тремя компонентами шихты: коксом, чугуном и шлаком.

В такой постановке математически задача описывается следующей системой уравнений:

– для кокса, чугуна, шлака

$$c_{iM}\rho_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial \tau} + c_{iM}\rho_{iM}w_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i}f_{iM}(T - t_i) + \sum_{k=1}^{k=3} C_{\text{пр}ik} \left[ \left( \frac{t_k + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_i + 273}{100} \right)^4 \right] + \sum_{k=1}^{k=3} \alpha_i f_i (t_k - t_i); \quad (1)$$

– для газа

$$c_{\Gamma}\rho_{\Gamma}w_{\Gamma}\frac{\partial T}{\partial y} = \sum_{i=1}^{i=k} f_{iM} \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i} (T - t_i) \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями

$$y = 0, \quad t_i = t'_i(\tau); \quad y = y_0, \quad T = T'(\tau); \quad (3)$$

$$\tau = 0, \quad t_i = \Phi(y), \quad (4)$$

где  $y$  – текущая координата по высоте слоя;  $w$  – скорость, м/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_F$ ,  $\alpha_i$  – коэффициенты конвективного теплообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $c$  – теплоемкость, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $m'_i$  – коэффициент массивности;  $C_{\text{пр}ik}$  – приведенный коэффициент излучения, кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $f$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $T$ ,  $t$  – температура газа и материалов соответственно, °С; индексы:  $i = 1$  для кокса;  $i = 2$  для чугуна;  $i = 3$  для шлака;  $\Gamma$  – для газа;  $m$  – для материала.

Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось численным методом прямых.

Плотности орошения расплавом при выполнении расчетов определяли по производительности печи и выходу шлака. Средние скорости опускания коксовой насадки при расчете стационарного температурного поля принимали пропорциональными количеству кокса, сгорающего у фурм и расходуемого на науглероживание чугуна.

С целью учета изменения кажущейся теплоемкости за счет процессов плавления, прямого восстановления и науглероживания чугуна было принято допущение, что плавление железорудных материалов происходило мгновенно. Это позволило соответствующий тепловой эффект отнести к кажущейся теплоемкости чугуна и шлака пропорционально их количеству на входе в зону плавления. Затраты тепла на прямое восстановление отнесли к кажущейся теплоемкости кокса, а тепловой эффект науглероживания железа – к кажущейся теплоемкости чугуна. По высоте слоя распределение затрат тепла было принято равномерным. Кажущиеся теплоемкости материалов определяли методом последовательного приближения и коррекции отношения тепловых эффектов химических реакций к температурному интервалу нагрева каждого из потоков. Температура плавления железорудных материалов принималась равной 1250 °С, а температура газа на входе в теплообмен – 1900 °С. Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена определялись по данным работ [1, 6, 9].

Адаптацию модели проводили по варианту расчета стационарного распределения температур по высоте зоны расплава (рис. 1). Поскольку прямое сопоставление рассчитанных температур с действительными в зоне расплава произвести невозможно в силу сложности промышленного эксперимента, то достоверность полученных расчетом результатов оценивали по фактической конечной температуре чугуна и шлака на вы-

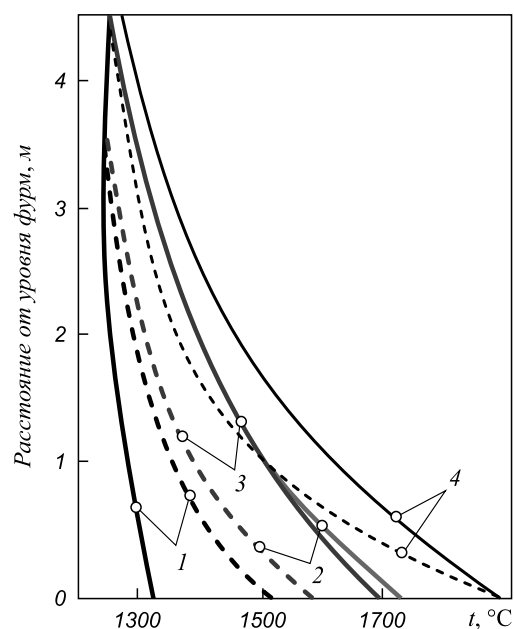


Рис. 1. Стационарные температурные поля чугуна (1), кокса (2), шлака (3) и газа (4) по высоте зоны расплава с учетом взаимного лучистого теплообмена между потоками (пунктирные линии) и без такого учета (сплошные линии)

Fig. 1. Stationary temperature fields of pig-iron (1), coke (2), slag (3) and gas (4) at the height of liquid phase zone taking into account mutual radiant heat exchange between streams (dashed lines) and without such account (continuous lines)

пусках. При этом учитывали, что температура кокса, поступающего в зону горения, близка к температуре шлака, а температура чугуна ниже температуры шлака на 40 – 60 °С [1]. Подобное различие температур получили и в результате расчета, что подтвердило правомерность допущений, принятых в модели.

При анализе результатов моделирования было установлено, что лучистый теплообмен в нижней части доменной печи действительно существенен. Так, разность температур между чугуном и коксом без учета лучистого теплообмена составляла 400 °С, а с его учетом – 80 °С. В свою очередь, вследствие интенсивного конвективного теплообмена между шлаком и коксом их температуры оказались близкими и различие между ними составило 5 – 10 °С.

На следующем этапе анализа исследовали переходные процессы при ступенчатом изменении температуры газа в фурменных очагах с 1900 до 2100 °С. При таком возмущении было отмечено, что температура чугуна, шлака и кокса повысилась на 60 – 70 °С. Изменения температуры шлака (кокса) и чугуна в переходном процессе приводили к единичному возмущению и были представлены в относительных единицах (рис. 2).

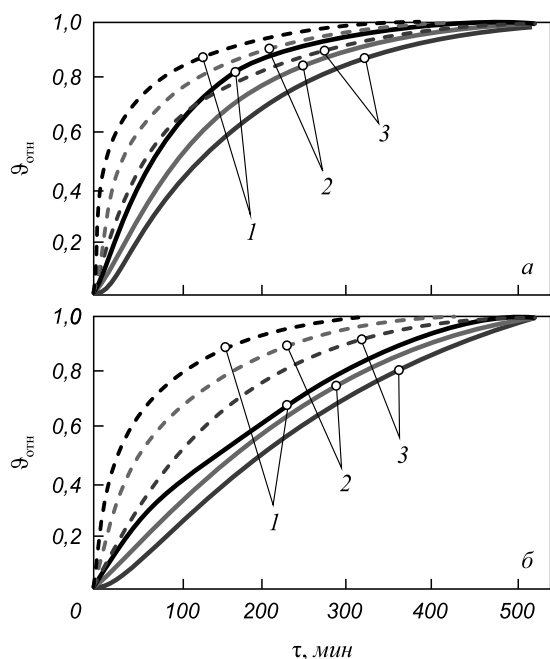


Рис. 2. Изменение температуры чугуна (сплошные линии), кокса и шлака (пунктирные линии) в переходном процессе при ступенчатом изменении температуры газа на входе в теплообмен с учетом (а) и без учета (б) теплообмена излучением на расстоянии от уровня фурм, м:  
1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0

Fig. 2. Change of temperature of pig-iron (continuous lines), coke and slag (dashed lines) in transient at step change of temperature of gas on an input in heat exchange with the account (a) and without the account (b) heat exchange by radiation on the distance level, m:  
1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0

Поэтому справедливо условие: при  $\tau \rightarrow \infty$  на всех горизонтах по высоте слоя  $\vartheta_{\text{отн}} = \frac{t_i(y) - t_i^0(y)}{t_i^\infty(y) - t_i^0(y)}$ , где  $t_i(y)$ ,  $t_i^0(y)$  и  $t_i^\infty(y)$  соответственно текущее, начальное и конечное (установившиеся) значение температур для  $i$ -го материала на данном горизонте слоя. Анализ результатов математического моделирования показал, что на разных горизонтах инерционность процессов неодинакова и возрастает от нижних горизонтов к верхним, что обусловлено различием тепловых потоков от газа к материалу по высоте зоны расплава. На уровне фурм, где существует максимальная разность температур газа и материалов, а, следовательно, и максимальная величина теплового потока, скорость нагрева (охлаждения) материалов максимальна. Моделирование также было выполнено в двух вариантах: с учетом лучистого теплообмена и без учета этого явления. Установлено, что лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева потока материалов и охлаждения потока газа. Учет лучистого теплообмена необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. В то же время учет различий в теплофизических свойствах кокса, чугуна, шлака и взаимного лучистого теплообмена между ними не оказывает заметного влияния на общую длительность переходных процессов.

Следует отметить, что общая закономерность, которая обобщает результаты по математическому моделированию процессов нестационарного теплообмена в слое, заключается в аperiodическом (неколебательном) характере переходных процессов. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. В связи с этим результаты моделирования нестационарного теплообмена в слое, учитывающие тепловые эффекты при восстановлении, дают лишь количественную оценку длительности переходных процессов и общие представления об их характере в отдельных участках слоя, но не для печи в целом.

Выполнить более глубокий анализ можно только с использованием полных динамических моделей, позволяющих учитывать основные явления в доменной печи от уровня засыпи до уровня чугуновых леток. Такой анализ был осуществлен Б.А. Боковиковым и В.И. Мойкиным с использованием математической модели доменного процесса (модель ВНИИМТ) [6] (рис. 3). В этих работах показано, что переходный процесс, оцениваемый по содержанию кремния в чугуне, имеет аperiodический (неколебательный) характер по каналу рудной нагрузки, когда при увеличении (уменьшении) последней содержание кремния в чугуне и его температура

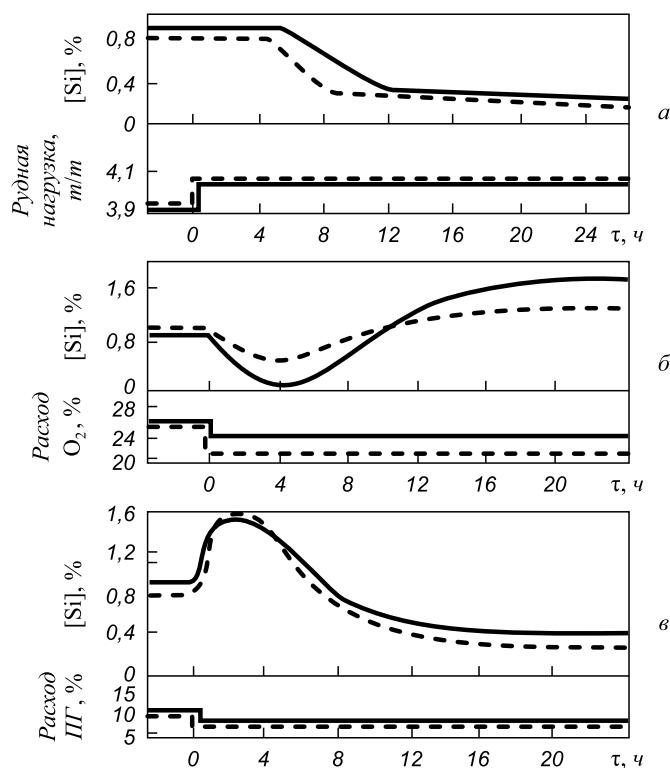


Рис. 3. Изменение содержания кремния в чугуна при ступенчатом изменении рудной нагрузки (а), расхода кислорода (б) и расхода природного газа (в)

Fig. 3. Change of the silicon content in pig-iron at step change of ore loading (a), the oxygen expense (б) and the natural gas expense (в)

монотонно падают (возрастают) и стремятся к новому установившемуся значению.

Однако при оценке по расходу природного газа и технологического кислорода такого аperiodического характера переходного процесса не наблюдается. Переходный процесс для этих случаев носит знакопеременный (колебательный) характер. Если в первый момент времени после снижения содержания кислорода в дутье температура в горне также снижается, что приводит к уменьшению содержания кремния в чугуна, то после прохождения примерно одного оборота материалов происходит разогрев продуктов плавки за счет снижения скорости опускания материалов, повышения температуры в шахте и увеличения степени восстановления в верхней ступени теплообмена.

Противоположная картина возникает при снижении расхода природного газа. В начальный момент времени в результате повышения температуры в горне содержание кремния в чугуна возрастает, однако по истечении времени, равного одному обороту материалов,

доменная печь начинает холодеть. Это обусловлено увеличением скорости схода материалов, уменьшением степени их восстановления в шахте из-за снижения в этом участке печи температуры как газа, так и шихты, а также уменьшения содержания водорода в восстановительном газе.

**Выводы.** Лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева (охлаждения) потоков и учет его необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. Колебательный переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Значение показателя перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп./ Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др.; Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
2. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спириин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 242 с.
3. De Castro Jose Adilson, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high operation // ISIJ International. 2000. Vol. 40. No. 7. P. 637 – 646.
4. Chew Sheng Jason, Zulli Paul, Yu Aibing. Modelling of liquid flow the blast furnace: Theoretical analysis of the effects of gas, liquid and packing properties // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 10. P. 1112 – 1121.
5. JianXu, Sheng-li Wu, Xin-yingGuo, Kai-ping Du. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduction shaft furnace. Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, P. 414 – 424.
6. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спириин, Б.А. Боковиков. – Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.
7. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // Труды института металлургии УФАН СССР. Ч. 1. Вып. 24. 1970. – 130 с. Ч. 2. Вып. 26. 1972. – 140 с.
8. Онорин О.П., Гладышев В.И., Каплун Л.И. Фильтрация железистых шлаковых расплавов через коксовую насадку // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 11 – 14.
9. Мысик А.Ф., Кукаркин А.С., Китаев Б.И., Бабушкин Н.М. Исследование теплообмена в орошаемом слое кусковых материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 125 – 128

Поступила 10 апреля 2015 г.



## DISPLACEABLE HEAT EXCHANGE IN THE SMELTING ZONE AND FEATURES OF TRANSIENTS IN BLAST FURNACE

**Yaroshenko Yu.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Shvydkii V.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Spirin N.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”  
(n.a.spirin@urfu.ru)

**Lavrov V.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Noskov V.Yu.**, Senior Lecturer of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin** (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Abstract.** The problem of non-stationary heat exchange in smelting zone of the blast furnace, considering features of process of a filtration of pig-iron and slag through coke nozzle was formulated. Blanket law consists in not oscillatory character of transients of heat exchange in a course. However this position is fair only under condition of a constancy of the relation of thermal capacities of streams of materials and gas on height of a considered site of a course that does not fully reflect the character of development processes exchange of heat at blast furnace height. It is shown, that not oscillatory transient in a blast furnace is observed if the indignation influences identically on a sign the bottom and top steps of heat interchange, and oscillatory – if it makes the opposite impact on these zones of the heat interchange. Thus the reregulation size will be that more than more essentially on size and on a sign this distinction is.

**Keywords:** blast-furnace process, heat exchange, smelting zone, mathematical modeling, transients.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-672-676

### REFERENCES

1. Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kur-nov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiya chuguna: uchebnik dlya vuzov* [Ironmaking: Textbook for universities]. Yus-fin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga. 2004. 774 p. (In Russ.).
2. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii B.C., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyshenie effektivnosti domennoi plavki* [Heat exchange and efficiency upgrading of blast-furnace melting]. Ekate-rinburg: izd. UGTU – UPI, 1995. 242 p. (In Russ.).
3. De Castro Jose Adilson, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high operation. *ISIJ International*. 2000. Vol. 40, no. 7, pp. 637–646.
4. Chew Sheng Jason, Zulli Paul, Yu Aibing. Modelling of liquid flow the blast furnace: Theoretical analysis of the effects of gas, liquid and packing properties. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41, no. 10, pp. 1112–1121.
5. Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Numerical sim-ulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduc-tion shaft furnace. *Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Sym-posium on Iron Ore*, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 414–424.
6. Ovchinnikov Yu.N., Moikin V.I., Spirin N.A., Bokovikov B.A. *Nestatsionarnye protsessy i povyshenie effektivnosti domennoi plav-ki* [Displaceable processes and improving the efficiency of blast fur-nace melting]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1989, 120 p. (In Russ.).
7. *Vosstanovlenie, teploobmen i gidrodinamika v domennom protsesse* [Restore, heat transfer and hydrodynamics in blast furnace process]. Shavrin S.V. ed. Trudy instituta metallurgii UFAN SSSR. Part. 1, Is-sue 24, 1970. 130 p. Part. 2, Issue 26, 1972. 140 p. (In Russ.).
8. Onorin O.P., Gladyshev V.I., Kaplun L.I. Filtering of ferrous slag melts through the coke packing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metal-lurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).
9. Mysik A.F., Kukarkin A.S., Kitaev B.I., Babushkin N.M. The in-vestigation of heat transfer in the fluidized layer of lumpy materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Met-allurgy*. 1975, no. 2, pp. 125–128. (In Russ.).

Received April 10, 2015