

Оригинальная статья

УДК 669

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКЕ
КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ**

© 2024 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, Е. А. Беленецкий, С. С. Фатьянов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. С использованием методики «горячего» моделирования для условий комбинированной продувки конвертерной ванны с подачей через днище перемешивающего нейтрального газа изучены особенности химической и температурной неоднородности расплава, особенности параметров образующихся реакционных зон и механизмы макрофизических процессов, возникающих при продувке металла. При обработке полученных экспериментальных данных получены численные значения эффективных коэффициентов диффузии и коэффициентов теплопроводности как характеристик, определяющих возможности повышения эффективности продувки и перемешивания конвертерной ванны. Установленные особенности поведения конвертерной ванны, особенности процессов в реакционной зоне и других участках ванны при комбинированной продувке подтверждают возможность повышения эффективности продувки и перемешивания расплава, а, следовательно, снижения химических и температурных градиентов.

Ключевые слова: конвертер, комбинированная продувка, горячее моделирование, тепломассообмен, температурная и химическая неоднородности

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Высокотемпературное моделирование процессов тепломассообмена при комбинированной продувке конвертерной ванны. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):100–109. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-100-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109)

Original article

**HIGH-TEMPERATURE MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES
IN COMBINED PURGING**

© 2024 E. V. Protopopov, A. A. Umansky, E. A. Belenetsky, S. S. Fatyanov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Using hot modeling technique for conditions of combined blowing of the converter bath with feeding of stirring neutral gas through the bottom, the features of chemical and temperature heterogeneity of the melt, features of parameters of the reaction zones formed and mechanisms of macro-physical processes occurring during metal blowing were studied. When processing the obtained experimental data, numerical values of effective diffusion coefficients and thermal diffusivity coefficients were obtained as characteristics determining the possibilities of increasing the efficiency of blowing and mixing of the converter bath. The established features of the converter bath behavior, features of processes in the reaction zone and other areas of the bath during combined blowing confirm the possibility of increasing the efficiency of blowing and mixing of the melt, and, consequently, reducing chemical and temperature gradients.

Keywords: converter, combined purging, hot modeling, heat and mass transfer, temperature and chemical heterogeneity

For citation: Protopopov E.V., Umansky A.A., Belenetsky E.A., Fatyanov S.S. High-temperature modeling of heat and mass transfer processes in combined purging. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):100–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-100-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109)

Введение

По возможностям получения новой информации при изучении конвертерного процесса высокотемпературное моделирование остается непревзойденным методом исследования механизма процессов, сопровождающих продувку расплава в конвертере различными технологическими газами.

Достигнутый на настоящий момент уровень развития техники высокотемпературного моделирования позволяет при соответствующей организации экспериментов получать необходимую информацию о гидродинамических [1 – 6] и тепломассообменных процессах при различных способах верхней и комбинированной продувки конвертерной ванны [7 – 12].

В настоящей работе с использованием отработанных ранее методик «горячего» моделирования выполнены исследования, которые позво-

ляют уточнить данные о структуре и параметрах образующихся реакционных зон в условиях комбинированной продувки кислородом сверху и донным перемешиванием расплава нейтральным газом и возникающими при этом в различных участках ванны температурных и химических градиентах [12; 13].

Эксперименты были выполнены на 60-кг многоцелевом конвертере, оснащённом необходимой контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой с использованием методик фиксации через прозрачную стенку конвертера, фотографической пирометрии и фото- и киносъемки происходящих при продувке макрофизических явлений.

Продувка кислородом передельного чугуна с содержанием 4,1 – 4,4 % C, 0,10 – 0,12 % Mn, 0,5 – 0,8 % Si осуществлялась с интенсивностью 3,5 – 4,0 м³/(т·мин) при использовании 4-сопловых

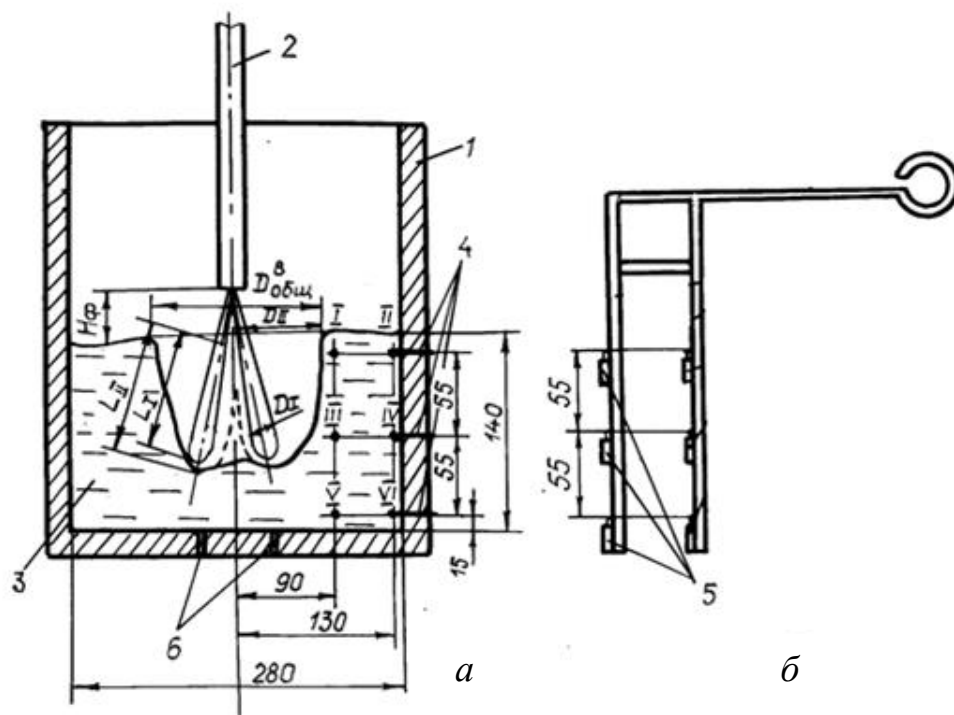


Рис. 1. Схемы основных параметров процесса, отбора проб металла и замера температуры из различных участков конвертерной ванны (размеры в мм) (а) и устройства пробоотборника (б):

1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – металлическая ванна; 4 – стационарные термопары ПР 30/6; I, II, III, IV, V, VI – точки отбора проб и замеров (II, IV, VI) температуры ванны; 5 – кварцевые пробники; 6 – донные фурмы (подача азота)

Fig. 1. Diagrams of the main process parameters, metal sampling and temperature measurement from various sections of the converter bath (dimensions in mm) (a) and the device/sampler (b):

1 – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – metal bath; 4 – stationary thermocouples PR 30/6; I, II, III, IV, V, VI – sampling points and measuring (II, IV, VI) bath temperature; 5 – quartz probes; 6 – bottom tuyeres (nitrogen supply)

верхних кислородных фурм с цилиндрическими соплами диаметром 1,7 и 1,3 мм, расположенными под углом 15 и 20° к вертикали, и с двумя одноканальными трубчатыми соплами диаметром 0,001 м, симметрично расположенными в днище при подаче азота с расходом 0,10 – 0,15 м³/(т·мин). Во время продувки верхняя фурма фиксировалась на высоте $H_{\text{ф}} = 20 \div 90$ калибров относительно уровня спокойной ванны (рис. 1). При проведении экспериментов в определенный период операции специальный пробоотборник вводился на 5 – 10 с в конвертер со смещением по радиусу относительно термопар вдоль стенки, что обеспечивало взятие проб металла и замер температуры в фиксированных горизонтах ванны.

Изменение содержания кремния, углерода и температуры по ходу продувки расплава в конвертере представлено на рис. 2, где по результатам шести точек взятия проб, соответствующих донному, среднему и поверхностному уровням, отображена информация по изменению параметров расплава на трех горизонтах ванны вдоль стенки агрегата.

По аналогии с верхней продувкой [5; 6; 9; 14] и в соответствии с рис. 1 в условиях исследуемого дутьевого режима комбинированной продувки расплава зафиксированные с использованием фото- и киносъемки геометрические параметры образующейся реакционной зоны в период интенсивного обезуглероживания ванны имели следующие максимальные значения, мм: $D_I = 25$;

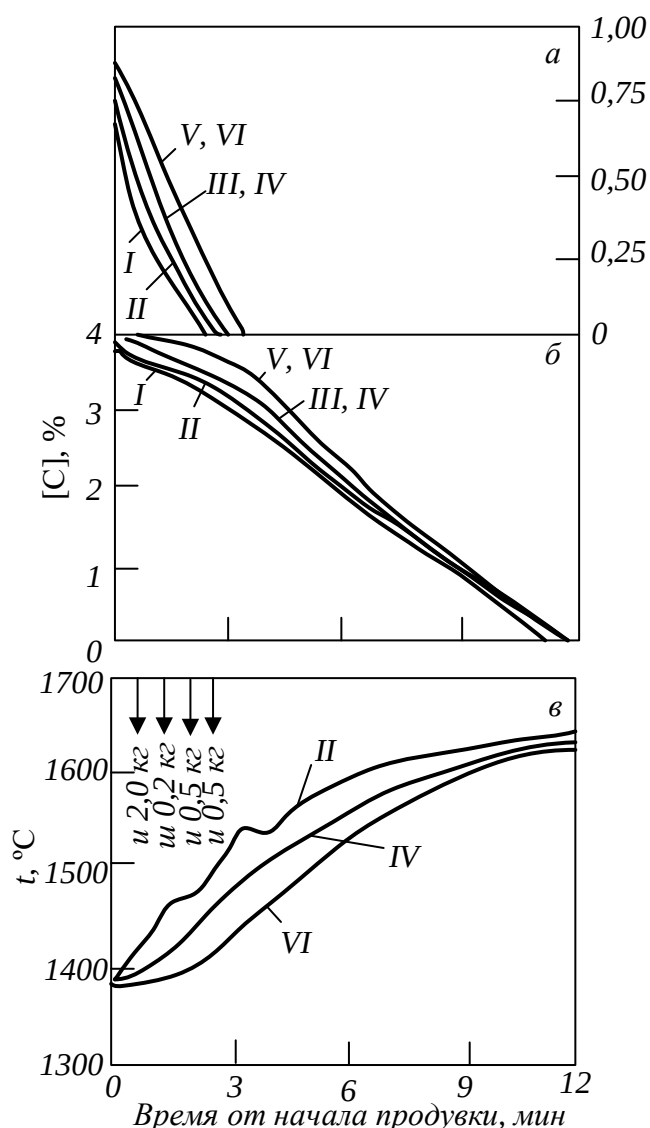


Рис. 2. Усредненные значения содержания кремния (а), углерода (б) и температур (в) на различных горизонтах конвертерной ванны по ходу операции при интенсивности продувки кислородом 3,8 м³/т·мин через 4-сопловую фурму (высота фурмы – 30 калибров; продувка азотом через два сопловых блока в днище с расходом 0,1 м³/т·мин.):

и, ш – присадки извести и плавикового шпата

Fig. 2. Average values of silicon (a), carbon (б) and temperatures (в) at different horizons of the converter bath during purging at an oxygen purge intensity of 3.8 м³/т·мин through a 4-nozzle tuyere (tuyere height – 30 calibers; nitrogen purge through two nozzle blocks in the bottom with a flow rate of 0.1 м³/т·мин.): и, w – additives of lime and fluorspar

$D_{II} = 90$; $D_{\text{общ}}^e = 185$; $L_I = 80$; $L_{II} = 92$. В данных условиях при общем повышении температуры металла в диапазоне 1350 – 1650 °С определенная методом фотографической пирометрии температура [15] в пределах первичной и вторичной реакционных зон составляла 1800 – 2000 и 1650 – 1850 °С соответственно (рис. 3 – 5).

Установлено, что концентрация кремния в поверхностных горизонтах ванны (рис. 2, а) значительно меньше, чем в нижних горизонтах,

в особенности в начальный период продувки. Приблизительно через 30 с после начала операции перепад концентрации по содержанию кремния составлял 0,25 – 0,35 %. Вследствие низкого содержания марганца в используемом чугуна перепад его концентраций по высоте ванны практически не зафиксирован.

В начальный период продувки характерный вид кривых, отражающих изменение концентрации углерода на различных горизонтах ванны

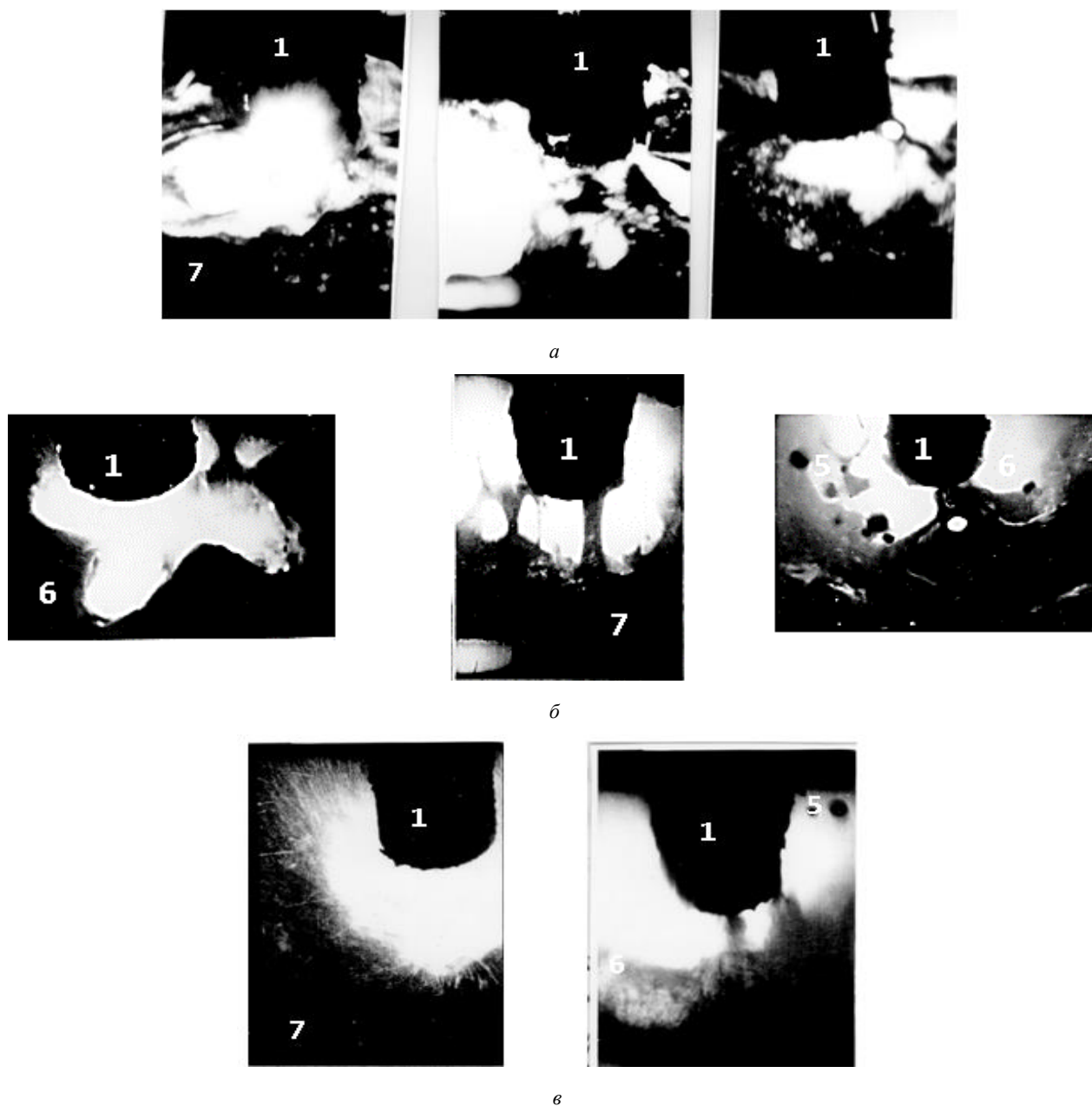


Рис. 3. Картина комбинированной продувки расплава ($f_{\text{C}} = 3,2 \div 3,4 \%$) в соответствии с рис. 2 ($P_{\text{O}_2} = 1,0 \div 1,3$ МПа; $H_{\text{ф}} = 30 \div 50$ калибров; интервал между кадрами 0,5 с):

а – в режиме глубокого проникновения кислородных струй; б – в режиме наводки шлака «заглубленной» струей; в – при «свернутом» шлаке

Fig. 3. The picture of combined melt purging ($f_{\text{C}} = 3.2 \div 3.4 \%$) in accordance with Fig. 2 ($P_{\text{O}_2} = 1.0 \div 1.3$ MPa; $H_{\text{ф}} = 30 \div 50$ calibers; interval between frames 0.5 s):

а – in the mode of deep penetration of oxygen jets; б – in the mode of slag aiming with a "buried" jet; в – with the slag "rolled up"

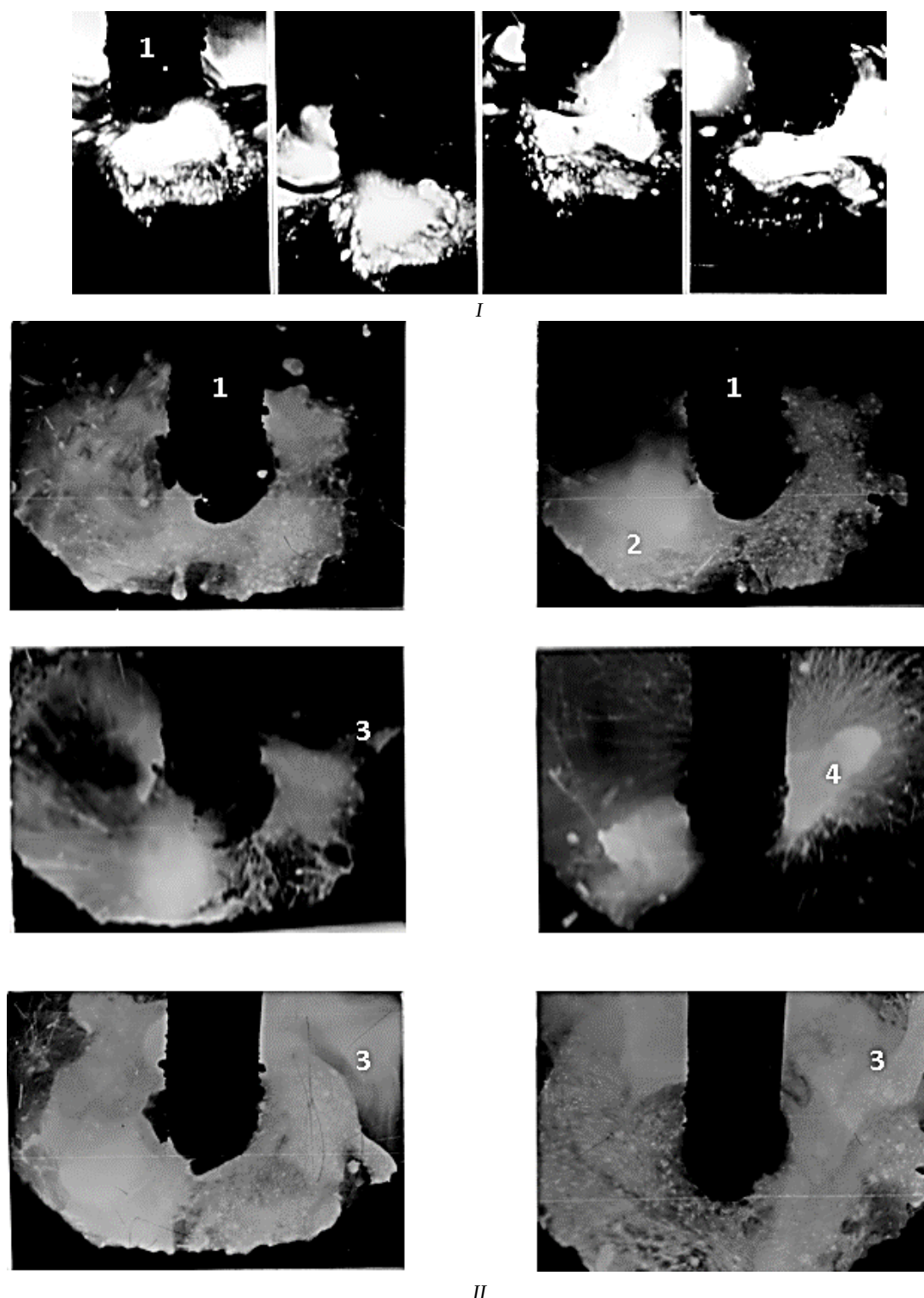


Рис. 4. Картина выхода на поверхность конвертерной ванны газообразных продуктов реакции обезуглероживания (I) (интервал между кадрами 0,5 с) и образование выбросов в условиях мягкой продувки (II) (в соответствии с рис. 3): 1 – фурма; 2 – пузыри CO, выходящие на поверхность шлака; 3 – выбросы металла и шлака; 4 – выход CO из реакционной зоны; 5 – корольки металла; 6 и 7 – формирующийся и «свернутый» шлак

Fig. 4. The picture of the release of gaseous products of the decarburization reaction to the surface of the converter bath (I) (the interval between frames is 0.5 s) and the formation of emissions under soft purge conditions (II) (in accordance with Fig. 3): 1 – tuyere; 2 – CO bubbles coming out onto the slag surface; 3 – metal and slag emissions; 4 – CO exit from the reaction zone; 5 – metal kings; 6 and 7 – forming and "rolled" slag

(рис. 2, б), имеет практически горизонтальный участок, что свидетельствует о некотором замедлении обезуглероживания до момента снижения содержания кремния в расплаве, что, оче-

видно, связано с быстрым окислением последнего при более высоком химическом сродстве к кислороду. После окисления кремния и нагреве ванны до температуры 1400 – 1450 °С практически

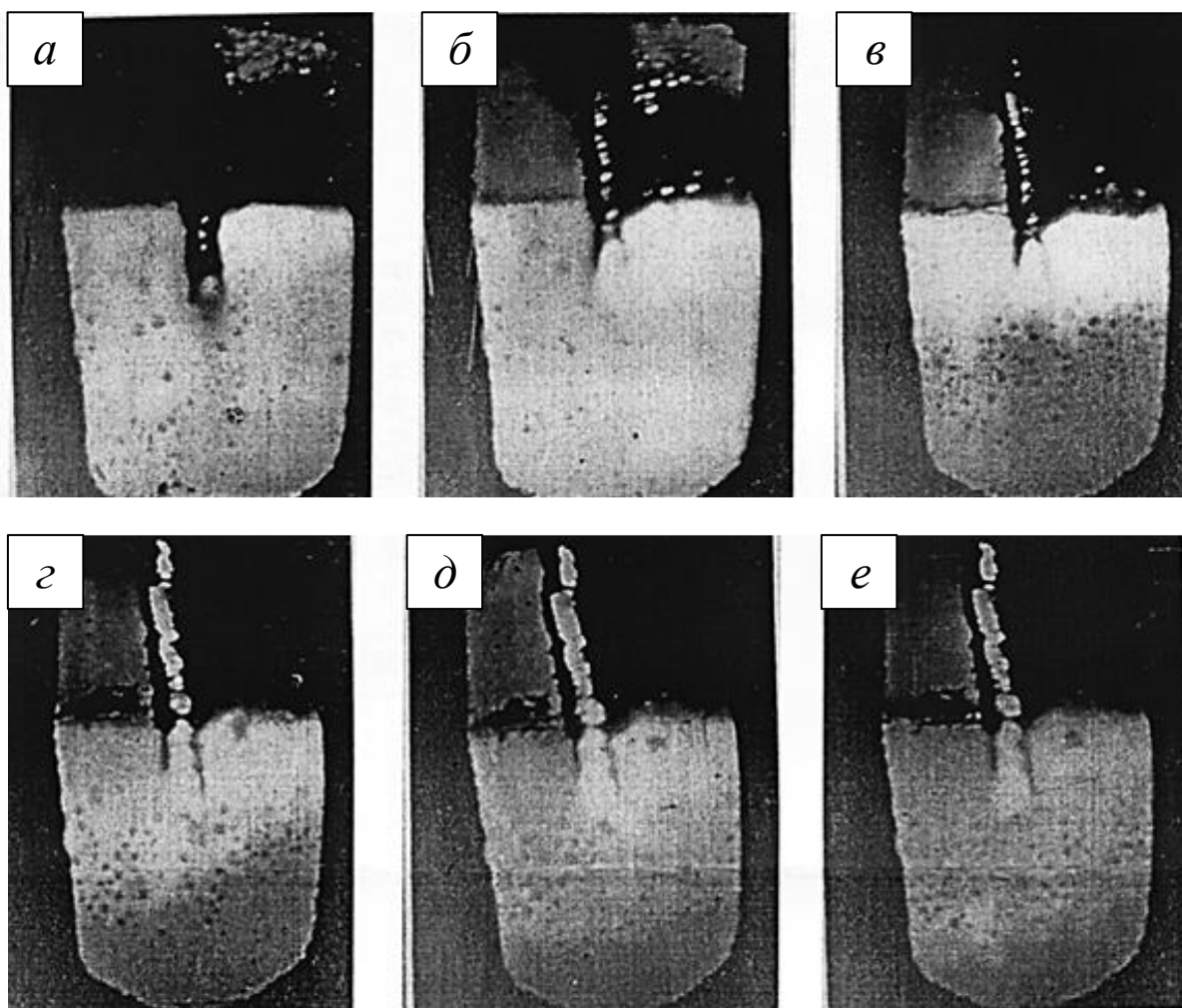


Рис. 5. Картина перемещения перегретых объемов металла из реакционной зоны в объем ванны (а – е) при расходе кислорода сверху $3,5 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$ и расходе азота через два донных сопла – $0,09 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$, интервал между кадрами 8 с
 Fig. 5. The picture of the movement of superheated volumes of metal from the reaction zone into the volume of the bath (a – e) with an oxygen consumption of $3.5 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$ from above, nitrogen consumption through two bottom nozzles – $0.09 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$, the interval between frames is 8 s

через несколько секунд развивается интенсивное обезуглероживание расплава. При этом концентрация углерода в верхних участках ванны в течение значительного времени операции меньше на $0,05 - 0,45 \%$ по сравнению с придонной зоной металла. Следует отметить, что разница по содержанию углерода и кремния в точках отбора III и IV, а также V и VI (рис. 1), как правило, находилась в пределах точности химического анализа.

Подобно зафиксированной химической неоднородности металла (рис. 2, а, б) при комбинированной продувке расплава также установлена температурная неоднородность конвертерной ванны (рис. 2, в). Так, с началом операции продувки температура расплава интенсивно растет прежде всего в поверхностных горизонтах ванны, при этом отмечается кратковременное снижение температуры ванны у поверхности после присадки шлакообразующих материалов в металл.

Как установлено (рис. 5), наблюдается существенное различие в скорости нагрева расплава вблизи поверхности ванны и у дна (рис. 2, в). В течение некоторого времени операции практически не фиксируется значительное повышение температуры расплава у дна конвертера, в то же время верхние горизонты ванны интенсивно нагревались, зона перегрева расплава постепенно расширялась по направлению к дну за счет развития циркуляции, что также зафиксировано киносъемкой через прозрачную стенку конвертера (рис. 5).

Как и в более ранних работах [5; 6; 8] в условиях верхней продувки при рабочей высоте фурмы $25 \div 35$ калибров основные реакции рафинирования металла происходят преимущественно в области обобщенной реакционной зоны, поэтому зафиксированный перепад концентраций углерода и кремния в различных горизонтах ванны может быть представлен как своеобразный индикатор диффузионных затрудне-

ний в поставке окисляемых примесей к месту протекания реакций, то есть в реакционную зону [14; 16; 17]. При этом можно предполагать, что градиент концентраций указанных химических элементов будет определяться соотношением скорости окисления примесей в реакционной зоне, скорости доставки примесей с новыми порциями металла в эту зону циркуляционными потоками и расходом перемешивающегося газа, подаваемого через днище конвертера.

Зафиксированные особенности температурной и химической неоднородностей конвертерной ванны при комбинированной продувке позволяют предположить следующую схему развития процессов тепломассопереноса в расплаве. Преимущественное окисление углерода и шлакообразующих примесей, прежде всего кремния, марганца и железа в пределах обобщенной реакционной зоны, а также преобладающее выделение в ней тепла вследствие экзотермических реакций окисления этих химических элементов приводят к значительному перегреву (до 600 – 800 °С) данной зоны по отношению к остальному объему расплава. В дальнейшем перегретые и лишённые части окислившихся примесей объёмы металла из реакционной зоны распространяются в отдаленные участки ванны. При этом за счет интенсивного всплывания газовых пузырей создается замкнутая направленная циркуляция потоков расплава, поднимающихся вверх в пределах периферии вторичной реакционной зоны и по поверхности радиально отесняющихся и далее опускающихся вдоль стенок конвертера. Зафиксировано, что наиболее интенсивная циркуляция происходит в пределах высоты ванны, соответствующей глубине проникновения верхних кислородных струй в металл в период интенсивного обезуглероживания, а характер упорядоченной циркуляции, прежде всего, будет определяться выходящим из реакционной зоны потоком оксида углерода СО. В условиях опытных плавов (рис. 2 – 5) экспериментально по скорости и кадрам киносъемки определены значения скорости перемещения перегретых потоков расплава из реакционной зоны в глубь ванны. Скорость составляла 0,05 – 0,8 м/с при интенсивности продувки кислорода 3,5 – 4,0 м³/т·мин при высоте расположения фурмы 20 – 90 калибров и расходе перемешивающегося газа через днище 0,1 м³/т·мин.

Установленные особенности химических, температурных градиентов и развития циркуляционных потоков в конвертерной ванне при комбинированной продувке свидетельствуют о том, что для снижения неоднородности расплава по ходу операции эффективным приемом можно считать варьирование режимов верхнего и

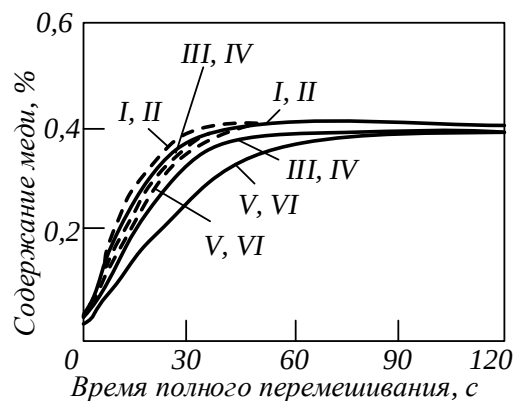


Рис. 6. Кривые изменения концентрации индикатора на различных горизонтах конвертерной ванны при верхней (—) и комбинированной (-----) продувке (обозначения у кривых – точки отбора проб в соответствии с рис. 1; ввод меди во время интенсивного обезуглероживания ванны на 5-й мин продувки)

Fig. 6. Curves of changes in the concentration of the indicator at different horizons of the converter bath during upper (—) and combined (-----) purging (the designations of the curves are sampling points in accordance with Fig. 1; copper injection during intensive decarbonization of the bath at the 5th minute of purging)

донного дутья и периодическое распространение объединенной реакционной зоны на всю глубину ванны.

Уменьшить химическую и температурную неоднородности конвертерной ванны, повысить интенсивность направленной циркуляции расплава удастся при комбинированной донной подаче перемешивающего нейтрального газа. В условиях экспериментов при подаче нейтрального газа через два трубчатых сопла, расположенных осесимметрично в днище конвертера с расходом 0,10 – 0,15 м³/т·мин под основания верхних реакционных зон, температура расплава верхних горизонтов ванны превышает таковую для нижних горизонтов примерно на 10 – 30 °С. В то же время при кратковременном отключении подачи нейтрального газа (60 – 120 с) в результате ухудшения перемешивания ванны фиксируется более значительный температурный перепад (до 90 – 100 °С) на указанных участках [11].

Анализом отобранных проб металла с момента ввода неокисляемого индикатора (навески жидкой меди) зафиксирован практически один и тот же вид кривых выравнивания (отклика) трассера по объему ванны, состоящих из плавно возрастающего, а после достижения максимума концентрации индикатора практически прямолинейного участков (рис. 6). Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивное распространение индикатора в значительной степени происходит в основном только в пределах объема ванны, где циркулируют перегретые потоки расплава с расширением зоны циркуляции при интенсивной

подаче перемешивающего нейтрального газа [15]. Это приводит к значительному перепаду концентрации меди между верхними и нижними горизонтами ванны, особенно на начальном этапе операции (рис. 6). Повышение «жесткости» верхнего дутья и применение комбинированной продувки, а, следовательно, улучшение перемешивания ванны способствуют уменьшению времени усреднения концентрации введенного индикатора в расплаве.

Полученные экспериментальные данные были использованы для определения эффективных коэффициентов диффузии (D_3) и температуропроводности (a_3). Для установленного вида кривых отклика на введенный индикатор (рис. 6) в случае определения значений D_3 использовали известное выражение [18]:

$$D_3' = \frac{r^2(\tau_2 - \tau_1)}{9,2\tau_1\tau_2 \lg[C_2/C_1(\tau_2/\tau_1)^{3/2}]}, \quad (1)$$

где r – расстояние от точки ввода индикатора; τ_1, τ_2 – время отбора проб; C_1, C_2 – концентрация индикатора в моменты отбора проб.

С учетом скорости U направленных циркуляционных потоков металла для определения D_3 возможно применение также другого уравнения [18]:

$$D_3^2 = U^2(\tau_3 - \tau_2) / (9,2\{[\tau_2/(\tau_2 - \tau_1)] \cdot \lg[C_2/C_1(\tau_2/\tau_1)^{3/2}] - [\tau_3/(\tau_3 - \tau_1)] \cdot \lg[C_3/C_1(\tau_3/\tau_1)^{3/2}]\}); \quad (2)$$

здесь C_3, τ_3 – концентрация индикатора (C_3) в момент отбора (τ_3).

Для экспериментов в условиях комбинированной продувки расчеты значений D_3 по выражениям (1) и (2) определяют значение в пределах $(10 \div 36) \cdot 10^{-4}$ м²/с. При этом наблюдается достаточно хорошая сходимость полученных значений D_3^1 и D_3^2 при скорости циркуляционных потоков металла порядка 0,08 – 0,20 м/с.

При использовании данного подхода увеличение эффективного коэффициента диффузии (D_3) по мере увеличения садки агрегата для промышленных 160-т конвертеров следует ожидать изменения значений D_3 в диапазоне 0,12 – 0,28 м²/с [19].

Экспериментальные данные о фиксируемом температурном градиенте в конвертерной ванне при различных условиях продувки позволили получить количественную информацию об эффективном коэффициенте температуропроводности (a_3). Согласно описанной выше модели процесса теплопереноса для определения значения a_3 можно использовать выражение [19]:

$$\Delta t = \frac{Q}{C\rho_M} \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi D_3 \tau}} \right)^3 e^{-\frac{r^2}{4D_3 \tau}}, \quad (3)$$

где Δt – изменение температуры металла в фиксируемой точке под действием теплового источника; Q – мощность теплового источника; C и ρ_M – теплоемкость и плотность жидкого металла; r – расстояние.

Согласно выполненным расчетам для условий эксперимента величина a_3 составляет $(10 \div 25) \cdot 10^{-4}$ м²/с. По аналогии с работой [20] перенос полученных данных на условия работы промышленных агрегатов определяет значения a_3 на уровне 0,03 – 0,05 м²/с.

Выводы

Установленные особенности поведения конвертерной ванны, особенности процессов в реакционной зоне и других участках ванны при комбинированной продувке подтверждают возможность повышения эффективности продувки и перемешивания расплава, а, следовательно, снижения химических и температурных градиентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rote F.E., Flinn R.A. Experimental observation of chemical and thermal gradients in an experimental BOF. *Met. Trans.* 1972;3(6):1973–1984.
2. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия.* 1978;(4):40–46.
3. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия.* 1991;(12):16–18.
4. Galloway S.M., Green M.J., Balafce S.R. Improvement in furnace performance at inland. *Iron and Steelmaker.* 1992;(1):38–43.
5. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса.* Киев-Донецк: Вища школа, 1981:183.
6. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Лаврик Д.А., Мастеровенко Е.Л. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2002;(12):16–21.
7. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. *Теория продувки сталеплавильной ванны.* Москва: Металлургия, 1974:495.
8. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. О месте преимущественного окисления

шлакообразующих примесей при продувке металла кислородом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975;(2):22–27.

9. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И., Никитин Ю.П., Дорошенко В.А. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1974;(12):33–37.
10. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании конвертерных процессов. Аэрогидродинамическое подобие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;(8):26–31.
11. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1987;(4):25–29.
12. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;(10):5–9.
13. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;(10):20–24.
14. Зарвин Е.Я., Соломон Г.М., Волович М.И. Особенности массопереноса элементов в условиях верхней кислородной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1982;(6):29–34.
15. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;(6):17–22.
16. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;(8):23–29.
17. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;(4):14–17.
18. Скребцов А.М. *Радиоактивные изотопы в сталеплавильных процессах*. Москва: Металлургия, 1972:304.
19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. Москва: Наука, 1966:548.
20. Охотский В.Б., Пейзанский А.Д. Теплоперенос в конвертерной ванне. В кн.: *Сталеплавильное производство: Темат. отрас. сб. МЧМ СССР*. Москва: Металлургия, 1974;(3):85–87.

REFERENCES

1. Rote F.E., Flinn R.A. Experimental observation of chemical and thermal gradients in an experimental BOF. *Met. Trans.* 1972;3(6): 1973–1984.
2. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. On the issue of hot modeling of the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978;(4):40–46. (In Russ.).
3. Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991;(12):16–18. (In Russ.).
4. Galloway S.M., Green M.J., Balafce S.R. Improvement in furnace performance at inland. *Iron and Steelmaker*. 1992;(1):38–43.
5. Baptizmansky V.I., Okhotsky V.B. *Physico-chemical bases of the oxygen converter process*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981:183. (In Russ.).
6. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko E.L. Investigation of the structure and parameters of reaction zones during upper purging applied to the design of multi-purpose converter tuyeres. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002;(12):16–21. (In Russ.).
7. Yavovskiy V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *The theory of purging a steelmaking bath*. Moscow: Metallurgiya, 1974:495. (In Russ.).
8. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. On the place of predominant oxidation of slag-forming impurities during metal purging with oxygen. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975;(2):22–27. (In Russ.).
9. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Studying the process of purging a converter bath using photographic photography. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974;(12):33–37. (In Russ.).
10. Similarity conditions in high-temperature modeling of converter processes. Aerohydrodynamic similarity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997;(8):26–31. (In Russ.).
11. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. On some features of the oxidation of impurities in a converter bath during combined purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987;(4):25–29. (In Russ.).
12. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Investigation of the interaction of oxygen jets with waste converter gases. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996;(10):5–9. (In Russ.).
13. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gradients in a converter bath using high-temperature

- modeling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997;(10):20–24. (In Russ.).
14. Zarvin E.Ya., Solomon G.M., Volovich M.I. Features of mass transfer of elements in conditions of upper oxygen purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982;(6):29–34. (In Russ.).
 15. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of a converter bath under conditions of combined purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991;(6):17–22. (In Russ.).
 16. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic features of the behavior of a converter bath with various purging methods. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998;(8):23–29. (In Russ.).
 17. Mokhrinsky A.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Hydrodynamic modes of interaction of oxygen jets with a converter bath. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005;(4):14–17. (In Russ.).
 18. Skrebtsov A.M. *Radioactive isotopes in steelmaking processes*. Moscow: Metallurgy, 1972:304. (In Russ.).
 19. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1966:548. (In Russ.).
 20. Okhotsky V.B., Pezansky A.D. *Heat transfer in a converter bath. In the book: Steelmaking: Temat. branch of the USSR Ministry of Emergency Situations*. Moscow: Metallurgy, 1974;(3):85–87. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Евгений Анатольевич Беленецкий, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: info@vpk-oil.ru

Сергей Сергеевич Фатянов, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ssfatianov@mail.ru

Information about the authors

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7554-2168

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

E. A. Belenetsky, undergraduate student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: info@vpk-oil.ru

Sergei S. Fatianov, undergraduate student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: ssfatianov@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 26.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 13.09.2024

Received 26.08.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 13.09.2024