ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА БОРА В ШЛАКАХ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ НА РАСТВОРИМОСТЬ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ

А. А. БАБЕНКО, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
лаборатории стали и ферросплавов, babenko@gmail.com;

А. Н. СМЕТАННИКОВ, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов;

А. Г. УПОЛОВНИКОВА, канд. техн. наук, старший научный сотрудник
лаборатории пирометаллургии цветных металлов

(Институт металлургии Уральского отделения РАН, Россия, г. Екатеринбург)

Аннотация. Для обеспечения низкого содержания серы в стали осуществляется ее внепечная десульфурация в сталеразливочных ковшах. При формировании жидкоподвижных высокоосновных шлаков с высокими рафинирующими свойствами взамен плавикового шпата часто используется оксид бора, воздействие которого на стойкость огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей изучено недостаточно и требует детальных теоретических и экспериментальных исследований. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния оксида бора и основности шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ на растворимость периклазоуглеродистых огнеупоров. Исследования выполнены с использованием симплекс-решетчатого метода планирования. Результаты математического моделирования представлены в виде диаграммы состав – свойство (растворимость периклазоуглеродистого огнеупора). Анализ приведенных на диаграмме экспериментальных данных позволил получить новые сведения о влиянии основности и содержания оксида бора в шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 , на растворимость периклазоуглеродистых огнеупоров. Установлено, что шлаки, формируемые в области основности 2–3, содержащие 4–6 % B_2O_3 , достаточно агрессивно воздействуют на периклазоуглеродистые огнеупоры. Степень износа огнеупорного образца меняется в пределах от 20 до 40 %. Снижение содержания B_2O_3 в шлаке до 1–4 % при той же основности сопровождается снижением степени износа периклазоуглеродистого огнеупора до уровня не более 30 %. Шлаки основностью 3–4, содержащие 1–4 % B_2O_3 , характеризуются относительно низким агрессивным воздействием шлака на периклазоуглеродистый огнеупор. Степень его износа снижается до 8–12 % и практически не достигает 15 %. Смещение шлаков в область повышенной до 5 основности не приводит к существенному сокращению агрессивного воздействия шлака на огнеупор. Степень износа огнеупорного образца изменяется в пределах 6–10 % при содержании 1–4 % B_2O_3 и увеличивается до 12 % при 4–6 % B_2O_3 .

Ключевые слова: внепечная десульфурация стали, синтетический шлак, рафинирующие свойства шлака, воздействие оксида бора на износ периклазоуглеродистых огнеупоров, диаграмма состав – свойство.

Ссылка для цитирования: Бабенко А.А., Сметанников А.Н., Уполовникова А.Г. Влияние основности и содержания оксида бора в шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ на растворимость периклазоуглеродистых огнеупоров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 4. С. 390–395.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-390-395

INFLUENCE OF BASICITY AND BORON OXIDE CONTENT IN SLAGS OF $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ SYSTEM ON SOLUBILITY OF PERICLASE-CARBON REFRACTORIES

A. A. BABENKO, HD (Tech.), Sen. Res. Ass., Lab. of Steel and Ferroalloys, babenko251@gmail.ru;

A. N. SMETANNIKOV, Jun. Res. Ass., Lab. of Steel and Ferroalloys;

A. G. UPOLOVNIKOVA, PhD (Tech.), Sen. Res. Ass., Lab. of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals
(Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg)

Abstract. To ensure a low content of sulfur in steel, desulphurization of it in steel ladles is used. To form liquid-movable high-basicity slags with high refining properties, boron oxide is often used instead of fluorspar, the effect of which on the resistance of the refractory lining of steel ladles has not been sufficiently studied and requires detailed theoretical and experimental studies. Results of experimental studies of the influence of the basicity and content of boron oxide in the slags of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ system on

periclase-carbon refractories solubility presented. The studies were carried out using the simplex-lattice planning method. The results of mathematical modeling are presented in the form of a composition-property diagram (solubility of periclase-carbon refractories). Analysis of the experimental data shown in the diagram provided new information about the influence of basicity and boron oxide content in the slags of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system containing 15% Al_2O_3 on the solubility of periclase-carbon refractories. It was found that slags formed in the basicity region 2–3, containing 4–6% B_2O_3 , affect quite aggressively the periclase-carbon refractories. The degree of wear of the refractory sample varies within limits from 20 to 40%. A decrease in the content of B_2O_3 in the slag down to 1–4% with the same basicity is accompanied by a decrease of the wear degree of the periclase-carbon refractory down to 30% max. Slags of basicity 3–4 at 1–4% B_2O_3 are characterized by a relatively low aggressive slag effect on the periclase-carbon refractory. The wear degree of periclase-carbon refractory is reduced to 8–12% and practically does not reach 15%. The displacement of slags basicity to the area of increased basicity up to 5 does not lead to a significant reduction in the aggressive impact of slag on the refractory. The degree of wear of the refractory sample varies within 6–10% at the content of 1–4% B_2O_3 and increases to 12% at 4–6 % B_2O_3 .

Keywords: extra-thermal desulphurization of steel, synthetic slag, refining properties of slag, the effect of boron oxide on the wear of periclase-carbon refractories, composition-property diagram.

For citation: Babenko A.A., Smetannikov A.N., Upolovnikova A.G. Influence of basicity and boron oxide content in slags of $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ system on solubility of periclase-carbon refractories. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 4, pp. 390-395. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-390-395

Одним из важных факторов повышения качества металла является внепечное рафинирование жидкой стали. Основная технологическая функция рафинирования — возможно более полное очищение металла от серы. Для обеспечения низкого содержания серы в стали процесс десульфурации металла осуществляют в сталеразливочных ковшах под шлаками системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с добавлением плавикового шпата [1–5]. Однако экологическая вредность плавикового шпата в совокупности с формированием самораспадающихся основных ковшовых шлаков значительно усугубляет экологическую обстановку в регионе наряду со снижением стойкости футеровки [6]. Для формирования жидко-

подвижных высокоосновных шлаков с высокими рафинирующими свойствами часто взамен плавикового шпата используется оксид бора [4, 7–9]. Однако информация о степени воздействия оксида бора основных шлаков на стойкость огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствует и требует детальных теоретических и экспериментальных исследований. В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния оксида бора и основности шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ на растворимость периклазоуглеродистых огнеупоров.

Экспериментальная часть

Исследование влияния оксида бора и основности шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ на растворимость периклазоуглеродистых огнеупоров выполнено с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента, позволяющего построить математические модели, описывающие зависимость изучаемого свойства от состава в виде непрерывной функции [10, 11]. При построении матрицы планирования эксперимента на переменные составляющие исследуемой оксидной системы наложены ограничения: $\text{CaO/SiO}_2 = 2\text{--}5$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 0\text{--}6\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\%$ (см. таблицу). Исследованная область шлаков изучаемой оксидной системы представлена в виде локального симплекса двумя концентрационными треугольниками

$\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, вершинами которого являются псевдокомпоненты Y_1, Y_2, Y_3 и Y_1, Y_3, Y_4 (рис. 1).

Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам $Y_1\text{--}Y_4$ (см. рис. 1) изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных в течение 2–3 ч при температуре 800 °С (B_2O_3 при температуре 105 °С) оксидов марки ч.д.а. Компоненты шлака перед загрузкой в тигель тщательно перемешивали. После расплавления шлак перемешивали в течение 30 мин с целью гомогенизации расплава [12]. Экспериментальные составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса [12–16].

МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

MATRIX OF THE EXPERIMENT PLANNING

№	Индекс шлака	Химический состав шлака, %					CaO/SiO ₂	Степень износа ΔM, %
		CaO	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO		
1	Y ₁	56,7	28,3	0	15	0	2	11,30
2	Y ₂	70,83	14,17	0	15	0	5	2,60
3	Y ₃	65,83	13,17	6	15	0	5	13,60
4	Y ₄	52,67	26,33	6	15	0	2	46,70
5	Y ₁₂	63,75	21,25	0	15	0	3	8,43
6	Y ₁₃	68	17	0	15	0	4	5,47
7	Y ₂₁	69,17	13,83	2	15	0	5	6,23
8	Y ₂₂	67,5	13,5	4	15	0	5	9,97
9	Y ₃₁	63,2	15,8	6	15	0	4	24,52
10	Y ₃₂	59,25	19,75	6	15	0	3	35,78
11	Y ₄₁	54	27	4	15	0	2	35,02
12	Y ₄₂	55,33	27,67	2	15	0	2	22,98
13	Y ₁₂₁	62,25	20,75	2	15	0	3	12,06
14	Y ₁₂₂	60,75	20,25	4	15	0	3	23,63
15	Y ₁₃₁	66,4	16,6	2	15	0	4	9,08
16	Y ₁₃₂	64,8	16,2	4	15	0	4	12,84

Рис. 1. Область варьирования состава шлака

Fig. 1. The area of slag composition varying

Эксперимент проводили в графитовых тиглях с внутренним диаметром 34 мм (рис. 2). Использовали шлаки массой 60 г, состав которых соответствует составу точек изучаемого локального симплекса (см. таблицу). Экспериментальные образцы массой 20 г вырезали из периклазоуглеродистого огнеупора в виде куба размером 19×19×19 мм. В графитовый тигель засыпали шлак массой 20 г и укладывали огнеупорный образец на поверхность шлака. Затем 20 г шлака засыпали равными порциями вдоль боковых граней куба. Последние 20 г шлака засыпали поверх куба. Тигель со шлаком и огнеупорным образцом нагревали в печи Таммана до температуры 1600°C и выдерживали при этой температуре 60 мин. После выдержки шлак с образцом

сливали в изложницу. Остатки шлака удаляли с поверхности образца методом выплавки при его выдержке в печи Таммана при температуре 1630 °С в течение 30 мин. После чего огнеупорный образец извлекался и измерялась его масса. Растворимость огнеупорного образца, выраженную в % (отн.), определяли по изменению его массы за время выдержки в шлаке.

Рис. 2. Расположение периклазоуглеродистого огнеупора в тигле со шлаком:

1 — графитовый тигель; 2 — периклазоуглеродистый образец; 3 — шлак

Fig. 2. Arrangement of periclase-carbon refractory in the crucible with slag:

1 — graphite crucible; 2 — periclase-carbon sample; 3 — slag

Для построения математических моделей, описывающих зависимости степени износа периклазоуглеродистых огнеупоров от состава шлаков, в качестве аппроксимирующей модели был выбран полином третьей степени, коэффициенты которого рассчитаны с использованием уравнений [9] и экспериментальных данных,

приведенных в таблице. Ниже приведены математические модели, описывающие влияние состава шлака на растворимость периклазоуглеродистого огнеупора для треугольников $Y_1Y_2Y_3$ (1) и $Y_1Y_3Y_4$ (2):

$$\Delta M_1 = 11,3X_1 + 2,6X_2 + 13,6X_3 + 0,4X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,09X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,5X_2X_3(X_2 - X_3) - 2,34X_1X_2X_3; \quad (1)$$

$$\Delta M_2 = 11,3X_1 + 13,6X_2 + 46,7X_4 - 1,62X_1X_4(X_1 - X_4) - 0,09X_1X_3(X_1 - X_3) + 1,53X_4X_3(X_4 - X_3) - 6,39X_1X_4X_3. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведена диаграмма состав – свойство (растворимость периклазоуглеродистого огнеупора в шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 , при температуре 1600 °C). Видно, что шлаки, формируемые в об-

ласти основности 2–3, содержащие 4–6 % B_2O_3 , характеризуются достаточно высоким агрессивным воздействием на периклазоуглеродистый огнеупор. Степень износа огнеупорного образца меняется в пределах 20–40 %.

Рис. 3. Диаграмма состав – свойство (растворимость периклазоуглеродистого огнеупора в шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 , при температуре 1600 °C) [сплошные линии — растворимость огнеупора в шлаке, % (отн.); пунктирные — основность шлаков]

Fig. 3. Composition-properties diagram (solubility of periclase-carbon refractory in $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, system slags, containing 15% of Al_2O_3 , at the temperature 1600 °C) [solid line — the solubility of the refractory in slag, % (rel.); dotted line — basicity of slags]

Снижение содержания B_2O_3 в шлаке до 1–4 % в том же диапазоне основности сопровождается уменьшением агрессивного воздействия шлака на периклазоуглеродистый огнеупор. Степень износа огнеупорного образца сокращается до 10–30 %. Формирование шлаков в области основности 3–4 при том же содержании B_2O_3 сопровождается снижением его агрессивного воздействия на огнеупор. Степень износа огнеупорного образца меняется в пределах 8–12 %, кото-

рая практически не достигает 15 %. Смещение шлаков в область повышенной до 5 основности не приводит к существенному сокращению их агрессивного воздействия на огнеупор. Степень износа огнеупорного образца изменяется в пределах 6–10 % при содержании 1–4 % B_2O_3 и увеличивается до 12 % при 4–6 % B_2O_3 . При этом ожидается рост себестоимости стали за счет увеличения расхода извести и материала, содержащего оксид бора.

Выводы

1. Результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием метода симплексных решеток планирования, позволили с минимальными временными и материальными затратами получить новые данные о влиянии основности шлака и содержания оксида бора на растворимость периклазоуглеродистых огнеупо-

ров в шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 .

2. Шлаки основностью 3–4, содержащие 1–4 % B_2O_3 , характеризуются низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку. Степень износа огнеупорных образцов изменяется в пределах 8–12 % и практически не достигает 15 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы внепечной обработки и непрерывной разливки стали. — М.: Теплотехник, 2008. — 528 с.
2. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО “Северсталь” с учетом технологических аспектов // Труды VI конгресса сталеплавыльщиков. — М.: АО “Черметинформация”, 2001. № 3. С. 63–66.
3. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. — М.: Metallurgiya, 1977. — 208 с.
4. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of B_2O_3 on Melting Temperature, Viscosity and Desulfurization Capacity of CaO-based Refining Flux // ISIJ International. 2011. V. 51. № 5. P. 702–708.
5. Курпас В.И., Крупман Л.И., Бродский С.С. Усовершенствованная технология внепечного рафинирования стали // Сб. научно-техн. статей из журнала “Сталь”. 1987. С. 61–64.
6. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали. — М.: Теплотехник, 2010. — 544 с.
7. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Медведовская И.А. Влияние B_2O_3 на вязкость шлаков системы CaO–SiO₂–Al₂O₃ // Известия АН СССР. Металлы. 1986. № 3. С. 55, 56.
8. Wang H.-M., Li G.-R., Dai Q.-X. etc. CAS-OB refining: slag modification with B_2O_3 –CaO and CaF_2 –CaO // Ironmaking and Steelmaking. 2007. V. 34. № 4. P. 350–353.
9. Бабенко А.А., Истомин С.А., Протопопов Е.В. и др. Вязкость шлаков системы CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 41–43.
10. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А. и др. Формирование основных борсодержащих шлаков — перспективное направление внепечной десульфурации и прямого микролегирования низкоуглеродистой стали бором // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 9 (1413). С. 50–54.
11. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С. и др. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167.
12. Ким В.А., Николай Э.И., Акбердин А.А., Куликов И.С. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков: методическое пособие. — Алма-Ата: Наука, 1989. — 116 с.
13. Бабенко А.А., Уполовникова А.Г., Жидовинова С.В., Сметанников А.Н. Влияние химического и фазового состава на вязкость шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащей 8 % MgO и 15 % Al₂O₃ // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 52. № 11. С. 96–101.
14. Бабенко А.А., Жучков В.И., Уполовникова А.Г., Рябов В.В. Применение метода симплексных решеток для построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащих 15 % Al₂O₃ и 8 % MgO // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 8. С. 601–605.
15. Бабенко А.А., Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Уполовникова А.Г. Равновесное распределение бора между металлом системы Fe–C–Si–Al и борсодержащим шлаком // Изв. вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 752–758.
16. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г., Михайлова Л.Ю. Построение диаграмм равновесного содержания бора в металле под шлаком системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃–15 % Al₂O₃–8 % MgO // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 60. № 10. С. 140–145.

Поступила 29 января 2020 г.

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1. Protsessy vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki stali* [Production of steel. Vol. 1. Processes of ladle treatment and continuous casting of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 528 p. (In Russ.).
2. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D. etc. *Kontseptsiya proizvodstva nizkoseristykh staley na OAO “Severstal” s uchetom tekhnologicheskikh aspektov* [Concept of low-sulphur steels production at OJSC “Severstal” accounting technological aspects]. *Tруды VI kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the VI Congress of Steelmakers]. Moscow: AO “Chermetinformatsiya”, 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
3. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovaniye stali* [Ladle refining of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
4. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of B_2O_3 on Melting Temperature, Viscosity and Desulfurization Capacity of CaO-based Refining Flux. *ISIJ International*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–708.
5. Kurpas V.I., Krupman L.I., Brodskii S.S. Perfected technology of ladle refining of steel. *Stal'*, 1987, pp. 61–64. (In Russ.).
6. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Production of steel. Vol. 3. Ladle treatment metallurgy of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
7. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Medvedovskaya I.A. Effect of B_2O_3 on viscosity of CaO–SiO₂–Al₂O₃ system slags. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1986, no. 3, pp. 55, 56. (In Russ.).
8. Wang H.-M., Li G.-R., Dai Q.-X. etc. CAS-OB refining: slag modification with B_2O_3 –CaO and CaF_2 –CaO. *Ironmaking and Steelmaking*, 2007, vol. 34, no. 4, pp. 350–353.
9. Babenko A.A., Istomin S.A., Protopyov E.V., Sychev A.V., Ryabov V.V. Viscosity of the CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ system slags. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2014, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
10. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Sel'menskikh N.I., Sychev A.V. Forming of basic boron-bearing slags – a perspective way of ladle desulphurization and direct micro-alloying by boron of low-carbon steel. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2017, no. 9 (1413), pp. 50–54. (In Russ.).

11. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. etc. Application of simplex-lattice method for building up diagrams of composition-property type. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1980, no. 9, p. 167. (In Russ.).
12. Kim V.A., Nikolai E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoistv metallurgicheskikh shlakov* [Planning of experiment at study of physical and chemical properties of metallurgical slags]. Alma-Ata: Nauka, 1989. 116 p. (In Russ.).
13. Babenko A.A., Upolovnikova A.G., Zhidovinova S.V., Smetannikov A.N. Effect of chemical and phase composition on viscosity of CaO–SiO₂–B₂O₃ system slags, containing 8 % MgO and 15 % Al₂O₃. *Butlerovskie soobshcheniya*, 2017, vol. 52, no. 11, pp. 96–101. (In Russ.).
14. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Upolovnikova A.G., Ryabov V.V. Application of simplex-lattice method for building up composition-viscosity diagrams of CaO–SiO₂–B₂O₃ system slags, containing 15 % Al₂O₃ and 8 % MgO. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 601–605. (In Russ.).
15. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Upolovnikova A.G. Equilibrium distribution of boron between metal of Fe–C–Si–Al system and boron-bearing slag. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 752–758. (In Russ.).
16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Mikhailova L.Yu. Building-up diagrams of equilibrium content of cerium in a metal under slag of CaO–SiO₂–Ce₂O₃–15 % Al₂O₃–8 % MgO system. *Butlerovskie soobshcheniya*, 2019, vol. 60, no. 10, pp. 140–145. (In Russ.).

Received January 29, 2020