

УДК 669.187. 539.4.66.043.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ B_2O_3 И ОСНОВНОСТИ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $CaO-SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3$ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НАСЫЩЕНИЯ ОКСИДОМ МАГНИЯ*

Бабенко А.А., д.т.н., ведущий научный сотрудник (babenko@gmail.com)

Сметанников А.Н., инженер-исследователь (artem.smetannikov.89@mail.ru)

Жучков В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)

Уполовникова А.Г., к.т.н., научный сотрудник (upol.ru@mail.ru)

Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Исследование влияния оксида бора B_2O_3 и основности шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3$ на концентрацию насыщения оксидом магния MgO выполнены методом симплексных решеток планирования эксперимента. Этот метод позволяет построить математические модели, описывающие зависимость изучаемого свойства от состава в виде непрерывной функции. Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных оксидов марки Ч.Д.А. Составы шлаков, соответствующих остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса. По экспериментальным данным были построены математические модели, адекватно описывающие влияние состава шлака на концентрацию насыщения оксидом магния MgO . Графическое изображение результатов математического моделирования представлено диаграммой состав – концентрация насыщения шлака оксидом магния MgO . Анализ приведенных на диаграмме экспериментальных данных позволил получить новые сведения о влиянии оксида бора и основности шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих Al_2O_3 , на концентрацию насыщения оксидом магния MgO . Установлено, что в шлаках, формируемых в области основности 2 – 3 и содержания оксида бора B_2O_3 1 – 3 %, концентрация насыщения оксидом магния MgO изменяется в пределах от 3 до 9 %. Повышение содержания оксида бора B_2O_3 в шлаке до 4 % приводит к росту концентрации насыщения шлака оксидом магния MgO до 11 – 13 %. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 4 основности характеризуется снижением концентрации насыщения оксидом магния MgO до 2 – 5 % при содержании оксида бора B_2O_3 1 – 3 % и увеличением до 7 – 9 % при содержании оксида бора B_2O_3 в шлаке 3 – 4 %. Формирование шлаков в области основности 4 – 5 и содержания оксида бора B_2O_3 1 – 3 % не приводит к существенному снижению концентрации насыщения шлака оксидом магния. Концентрация насыщения шлака оксидом магния MgO в данной области основности изменяется в пределах от 2 до 4 % и практически не достигает 7 % при увеличении содержания B_2O_3 до 4 %. При этом наблюдается рост себестоимости стали за счет увеличения расхода известки и материала, содержащего оксид бора.

Ключевые слова: планирование эксперимента, периклазовый огнеупор, синтетический шлак, основность, оксид бора, концентрация насыщения, диаграмма состав – свойство.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-123-127

ВВЕДЕНИЕ

В современной технологической схеме производства стали с высокими механическими, технологическими, эксплуатационными свойствами и низкими энергетическими и материальными затратами особое место занимает ковшевая металлургия [1 – 11]. Технологические приемы ковшевой металлургии направлены на решение постоянно растущих требований к качеству и себестоимости металлопродукции. Одним из них является глубокая десульфурация металла, которую осуществляют в сталеразливочных ковшах под высокоосновными шлаками системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ с добавлением плавикового шпата [5 – 11]. Такие добавки агрессивно воздействуют на футеровку сталеразливочных ковшей, особенно шлакового пояса, снижают ее стойкость. При этом качество и себестоимость

стали во многом определяются стойкостью огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей (особенно стойкостью шлакового пояса), рабочий слой которой выполняют с использованием магнезиальных огнеупоров [12 – 14]. Для сохранения и поддержания высокой стойкости огнеупорной футеровки необходимо формировать в сталеразливочных ковшах шлаки с низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку. В случае магнезиальной футеровки для уменьшения агрессивного воздействия на нее шлака он должен находиться в области насыщения оксидом магния MgO [15]. Теоретической предпосылкой этого служит известное положение химической термодинамики об отсутствии взаимодействия на поверхности раздела двух фаз в случае равенства концентрации диффундирующего компонента и концентрации насыщения [16]. Экологическая вредность летучих фторидов [1, 8] и их агрессивность по отношению к огнеупорной футеровке сталеразливочных ковшей вызывают необходимость

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 16-19-10435).

разработки основных бесфтористых шлаков с низкой вязкостью и высокими рафинирующими свойствами. Одним из направлений решения этой проблемы является использование оксида бора вместо плавикового шпата [8, 17, 18]. Однако информация о влиянии оксида бора на концентрацию насыщения основных шлаков оксидом магния MgO в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствует, требуются детальные теоретические и экспериментальные исследования. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния оксида бора и основности шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 , на концентрацию насыщения оксидом магния MgO .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование влияния оксида бора и основности шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 , на концентрацию насыщения оксидом магния MgO выполнены методом симплексных решеток планирования эксперимента, который позволяет построить математические модели, описывающие зависимость изучаемого свойства от состава в виде непрерывной функции [19, 20]. Математическая модель, описывающая связь изучаемого свойства с составом оксидной системы, была выбрана в виде полинома третьей степени. Исследованная область шлаков изучаемой оксидной системы представлена в виде симплекса двумя концентрационными треугольниками $CaO-SiO_2-B_2O_3$, вершинами которых являются псевдокомпоненты Y_1, Y_2, Y_3 и Y_1, Y_3, Y_4 (рис. 1).

Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных оксидов марки Ч.Д.А. Экспериментальные составы шлаков, соответствующих остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вер-

шин симплекса. Эксперименты для определения концентрации насыщения шлаков оксидом магния MgO изучаемой оксидной системы проводили в графитовых тиглях. Опытные образцы, вырезанные из периклазового огнеупора в форме куба, массой 14,3 г, выдерживали при температуре 1620 °С в шлаках изучаемой оксидной системы в течение 60 мин. Составы исследуемых шлаков в координатах псевдокомпонентов (в дол. ед.), исходных компонентов (% (по массе)) и экспериментальные значения концентрации насыщения шлака оксидом магния MgO приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для построения математических моделей, описывающих зависимости концентрации насыщения шлаков оксидом магния от состава шлаков, в качестве аппроксимирующей модели был выбран полином третьей степени, коэффициенты которого рассчитаны с использованием уравнений [19] и экспериментальных данных, приведенных в таблице.

Математическая модель имеет вид:

для треугольника Y_1, Y_2, Y_3

$$(MgO)'_n = 3,9X_1 + 0,98X_2 + 6,14X_3 + 0,14X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,09X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,225X_2X_3(X_2 - X_3) - 0,99X_2X_3; \quad (1)$$

для треугольника Y_1, Y_3, Y_4

$$(MgO)''_n = 3,9X_1 + 6,14X_3 + 14,05X_4 - 0,495X_1X_4(X_1 - X_4) - 0,09X_1X_3(X_1 - X_3) + 0,405X_4X_3(X_4 - X_3) - 2,25X_1X_4X_3. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) оказались адекватными при уровне значимости 0,05. С их помощью рассчитаны концентрации насыщения шлаков оксидом магния, необходимые для построения диаграмм состав – свойство.

На рис. 2 приведена диаграмма состав – концентрация насыщения шлака оксидом магния, характеризующая влияние химического состава шлака изучаемой оксидной системы на концентрацию насыщения оксидом магния.

Установлено, что в шлаках, формируемых в области основности 2 – 3 и содержания оксида бора B_2O_3 1 – 3 %, концентрация насыщения оксидом магния MgO изменяется от 3 до 9 %. Повышение содержания B_2O_3 в шлаке до 4 % приводит к росту концентрации насыщения шлака оксидом магния MgO до 11 – 13 %. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 4 основности характеризуется снижением концентрации насыщения оксидом магния MgO до 2 – 5 % при содержании B_2O_3 1 – 3 % и увеличением до 7 – 9 % при содержании B_2O_3 в шлаке 3 – 4 %. Формирование шлаков

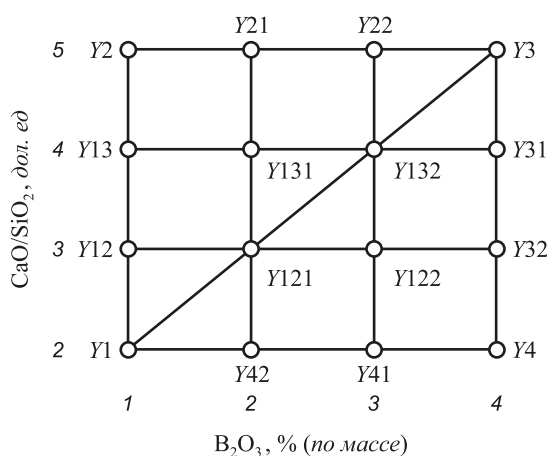


Рис. 1. Область варьирования состава шлака

Fig. 1. Field of slag composition variation

Матрица планирования эксперимента

Experiment planning matrix

№	Индекс шлака	Состав шлака								$\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)^*$	$(\text{MgO})_{\text{H}}^{**}$
		В координатах псевдокомпонентов, дол. ед.				В координатах исходных компонентов, % (по массе)					
		X1	X2	X3	X4	CaO	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		
1	Y1	1,00	0	0	0	56,00	28,00	1,00	15,00	2	3,90
2	Y2	0	1,00	0	0	70,00	13,90	1,10	15,00	5	0,98
3	Y3	0	0	1,00	0	67,50	13,50	4,00	15,00	5	6,14
4	Y4	0	0	0	1,00	54,00	27,00	4,00	15,00	2	14,05
5	Y12	0,67	0,33	0	0	63,00	21,00	1,00	15,00	3	2,88
6	Y13	0,33	0,67	0	0	67,20	16,80	1,00	15,00	4	1,90
7	Y21	0	0,67	0,33	0	69,18	13,76	2,06	15,00	5	2,84
8	Y22	0	0,33	0,67	0	68,40	13,56	3,04	15,00	5	4,60
9	Y31	0	0	0,67	0,33	64,80	16,20	4,00	15,00	4	8,90
10	Y32	0	0	0,33	0,67	60,80	20,20	4,00	15,00	3	11,70
11	Y41	0,33	0	0	0,67	54,65	27,34	3,01	15,00	2	10,80
12	Y42	0,67	0	0	0,33	55,34	27,67	2,00	15,00	2	7,30
13	Y121	0,67	0	0,33	0	62,26	20,75	2,00	15,00	3	4,60
14	Y122	0,33	0	0,33	0,33	61,53	20,50	2,97	15,00	3	7,89
15	Y131	0,33	0,33	0,33	0	66,40	16,61	2,01	15,00	4	3,58
16	Y132	0,33	0	0,67	0	65,60	16,39	3,01	15,00	4	5,34

Примечание. * и ** – основность шлака и экспериментальные значения концентрации насыщения шлака оксидом магния MgO.

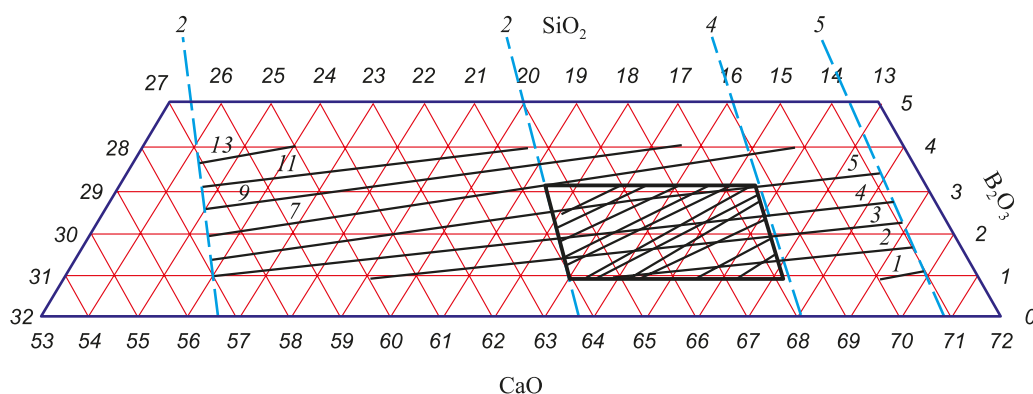


Рис. 2. Диаграмма состав – концентрация насыщения шлака оксидом магния MgO при температуре 1620 °C:
— — концентрация насыщения шлаков оксидом магния MgO; - - - - основность шлаков

Fig. 2. Diagram of composition – concentration of slag saturation with MgO at 1620 °C:
— — concentration of slag saturation with MgO; - - - - basicity of slags

в области основности 4 – 5 и содержании B₂O₃ 1 – 3 % не приводит к существенному снижению концентрации насыщения шлака оксидом магния. Концентрация насыщения шлака MgO в данной области основности изменяется в пределах от 2 до 4 % и практически не достигает 7 % при увеличении содержания B₂O₃ до 4 %. При этом наблюдается рост себестоимости стали за счет увеличения расхода извести и материала, содержащего оксид бора.

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований по определению концентрации насыщения шлаков оксидом магния, полученных методом симплексных решеток планирования, позволил с минимальными временными и материальными затратами получить новые данные о концентрации насыщения шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащих 15 % Al₂O₃. Обобщенно

ние результатов выполненных исследований, представленных в виде диаграммы состав – концентрация насыщения шлака оксидом магния MgO , позволило количественно оценить влияние основности шлака и содержания оксида бора B_2O_3 на концентрацию насыщения шлаков оксидом магния MgO . Шлаки основностью 3 – 4, содержащие 1 – 3 % B_2O_3 , характеризуются достаточно низкой концентрацией насыщения оксидом магния MgO , достигающей 2 – 5 % и, как следствие, низким агрессивным воздействием на огнеупор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
2. Jonsson Par G., Jonsson Lage T.I. The use of fundamental process models in studying ladle refining operations // ISIJ International. 2001. Vol. 4. No. 11. P. 1289 – 1302.
3. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J.V., Guo M., Blanpain B. Desulphurisation of Stainless Steel by Using $CaO-Al_2O_3$ Based Slags during Secondary Metallurgy // ISIJ International. 2013. Vol. 53. No. 3. P. 459 – 467.
4. Nurhudin, Maulud Hidayat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultra low sulfur steel at PT Krakatau Steel // SEAIISI Quarterly. 2004. Vol. 33. No. 2. P. 29 – 34.
5. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulfurisation technology in ladle furnace at KSC // Ironmaking and Steelmaking. 2003. Vol. 30. No. 2. P. 116 – 119.
6. Hideaki Suito, Ryo Inoue. Dissolution Behavior and Stabilization of Fluorine in Secondary Refining Slags // ISIJ International. 2002. Vol. 42. No. 8. P. 921 – 929.
7. Iwamasa P.K., Fruehan R.J. Formation and behaviour of Mn containing oxysulphide inclusions during desulphurisation, deoxidation and alloying // Metall. Mater. Trans. B. 1997. No. 28. P. 47.
8. Hongming W., Tingwang, 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.
9. Gaye H., Lehmann J. Modeling and prediction of reactions involving metals, slags and fluxes. – In: VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. P. 619 – 624.
10. Ko K.Y., Park J.H. Effect of CaF_2 Addition on the Viscosity and Structure of $CaO-SiO_2-MnO$ Slags // ISIJ International. 2013. Vol. 53. No. 6. P. 958 – 965.
11. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
12. Стариков В.С., Темлянец М.В., Стариков В.В. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии. – М.: МИСИС. 2003. – 328 с.
13. Кашеев И.Д. Свойства и применение огнеупоров. Справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 352 с.
14. Хорошавин Л.Б., Перепелин В.А., Коконов В.А. Магнезиальные огнеупоры. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
15. Шюрман Э., Манн Г., Ноле Д. и др. Влияние растворенной MgO на стойкость доломитовой футеровки кислородных конвертеров // Черные металлы. 1985. № 3. С. 33 – 41.
16. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
17. Wang H., Li G., Dai R. CAS-OB refining slag modification with B_2O_3-CaO and CaF_2-CaO // Ironmaking and Steelmaking. 2007. Vol. 34. No. 4. P. 350 – 353.
18. Бабенко А.А., Истомин С.А., Протопопов Е.В., Сычев А.В., Рябов В.В. Вязкость шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-B_2O_3$ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 2. С. 41 – 43.
19. 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.
20. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А. и др. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-B_2O_3$ // Бутлеровские сообщения. 2016. Т. 48. № 11. С. 40 – 44.

Поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

После доработки 10 декабря 2018 г.

Принята к публикации 10 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 2, pp. 123–127.

INFLUENCE OF B_2O_3 AND $CaO-SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3$ SLAG SYSTEM BASICITY ON CONCENTRATION OF MAGNESIUM OXIDE SATURATION

A.A. Babenko, A.N. Smetannikov, V.I. Zhuchkov, A.G. Upolovnikova

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Study of the effect of boron oxide and basicity of $CaO-SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3$ slag system on MgO saturation concentration was carried out using the simplex lattice method of experimental design, which allows one to construct mathematical models describing dependence of studied property on composition as a continuous function. Synthetic slags, corresponding in composition to vertices of studied simplex, were smelted in graphite crucibles from previously calcined oxides of analytical grade. Slag compositions corresponding to the remaining points of local simplex plan were obtained by counterblending slags of simplex tops. Using experimental data, mathematical models adequately describing effect of slag composition on saturation concentration of MgO were constructed. Graphic image of mathematical modeling results is represented by the composition diagram – saturation concentration of MgO . Analysis of experimental data presented in diagram made it possible to obtain new information on the effect of

boron oxide and basicity of $CaO-SiO_2-B_2O_3$ slags system containing Al_2O_3 on MgO saturation concentration. It was established that in slags formed in basicity range of 2 – 3 and B_2O_3 content of 1 – 3 %, saturation concentration of MgO varies from 3 to 9 %. Increase in B_2O_3 content in slag to 4 % leads to an increase in MgO saturation concentration in slag of 11 – 13 %. Displacement of slags to area of increased basicity up to 3 – 4 is characterized by a decrease in MgO saturation concentration to 2 – 5 %, with 1 – 3 % of B_2O_3 content and an increase to 7 – 9 % at 3 – 4 % B_2O_3 in slag. Formation of slags in basicity range of 4 – 5 and B_2O_3 content of 1 – 3 % does not lead to a significant decrease in concentration of slag saturation with magnesium oxide. Saturation concentration of MgO in slag in this area of basicity varies from 2 to 4 % and practically does not reach 7 % with an increase in B_2O_3 content to 4 %. At the same time, there is an increase in cost of steel due to an increase in consumption of lime and material containing boron oxide.

Keywords: experiment planning, periclase refractory, synthetic slag, basicity, boron oxide, MgO saturation concentration, composition-property diagram.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-123-127

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1. Protessy vyplavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Steel production. Vol. 1. The processes of smelting, secondary processing and continuous casting]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 528 p. (In Russ.).
2. Jonsson Par G., Jonsson Lage T. I. The use of fundamental process models in studying ladle refining operations. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 11, pp. 1289–1302.
3. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J., Guo M., Blanpain B. Desulphurisation of stainless steel by using CaO–Al₂O₃ based slags during secondary metallurgy. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 3, pp. 459–467.
4. Nurhudin, Maulud Hidayat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultralow sulfur steel at PT Krakatau Steel. *SEAIISI Quarterly*. 2004, vol. 33, no. 2, pp. 29–34.
5. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulfurization technology in ladle furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2003, vol. 30, no. 2, pp. 116–119.
6. Hideaki Suito, Ryo Inoue. Dissolution behavior and stabilization of fluorine in secondary refining slags. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, no. 8, pp. 921–929.
7. Iwamasa P.K., Fruehan R.J. Formation and behavior of Mn containing oxysulphide inclusions during desulphurisation, deoxidation and alloying. *Metall. Mater. Trans. B*. 1997, no. 28, pp. 47.
8. Hongming W., Tingwang, Hua Z. Effect of B₂O₃ on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–708.
9. Gaye H., Lehmann J. Modeling and prediction of reactions involving metals, slags and fluxes. In: *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004. pp. 619–624.
10. Ko K.Y., Park J.H. Effect of CaF₂ addition on the viscosity and structure of CaO–SiO₂–MnO slags. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 6, pp. 958–965.
11. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovanie stali* [Out-of-furnace steel refining]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
12. Starikov V.S., Temlyantsev M.V., Starikov V.V. *Ogneupory i futerovki v kovshevoi metallurgii* [Refractories and linings in ladle metallurgy]. Moscow: MISIS, 2003, 328 p. (In Russ.).
13. Kashcheev I.D. *Svoystva i primeneniye ogneuporov. Spravochnoe izdanie* [Properties and application of refractories. Reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 352 p. (In Russ.).
14. Khoroshavin L.B., Perepelitsin V.A., Kokonov V.A. *Magnezial'nye ogneupory* [Magnesia refractories]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001, 576 p. (In Russ.).
15. Shyurman E., Mann G., Nole D., etc. Effect of dissolved MgO on stability of dolomite lining of oxygen converters. *Chernye metally*. 1985, no. 3, pp. 33–41. (In Russ.).
16. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Boronenkov V.N. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 463 p. (In Russ.).
17. Wang H., Li G., Dai R. CAS-OB refining slag modification with B₂O₃ – CaO and CaF₂ – CaO. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, no. 4, pp. 350–353.
18. Babenko A.A., Istomin S.A., Protopopov E.V., Sychev A.V., Ryabov V.V. Viscosity of CaO – SiO₂ – Al₂O₃ – MgO – B₂O₃ slag system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
19. Kim V.A., Nikolai E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoystv metallurgicheskikh shlakov. Metodicheskoe posobie* [Planning an experiment in study of physicochemical properties of metallurgical slags. Manual]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., etc. Application of the method of simplex lattices to construct composition-viscosity diagrams of slags of CaO – SiO₂ – Al₂O₃ – MgO – B₂O₃ system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016, vol. 48, no. 11, pp. 40–44. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 16-19-10435).

Information about the authors:

A.A. Babenko, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher
(babenko251@gmail.com)

A.N. Smetannikov, Research Engineer
(artem.smetannikov.89@mail.ru)

V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher
(ntm2000@mail.ru)

A.G. Upolovnikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(upol.ru@mail.ru)

Received November 23, 2018

Revised December 10, 2018

Accepted December 10, 2018