

УДК 669.187.28:539.55

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИМПЛЕКСНЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ СОСТАВ – ВЯЗКОСТЬ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, СОДЕРЖАЩИХ 15 % Al_2O_3 И 8 % MgO^*

Бабенко А.А., д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии
цветных металлов (babenko@gmail.com)

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

Уполовникова А.Г., к.т.н., старший научный сотрудник

Рябов В.В., научный сотрудник

Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. В работе приведены результаты построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO с использованием метода симплексных решеток, который позволит получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции. Исследованию подвергался ограниченный участок в виде локального симплекса, представленного двумя концентрационными треугольниками $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$. Планирование эксперимента осуществляли в координатах псевдокомпоненты. Для описания зависимости вязкости шлака от его состава была выбрана математическая модель в виде полинома III степени. В матрице планирования эксперимента составы шлаков приведены в координатах псевдокомпонентов и исходных компонентов. Шлаки, соответствующие по составу вершинам изучаемого локального симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных оксидов марки ЧДА. Составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса. В опытах для измерения вязкости шлаков использовали молибденовые тигли. Измерения осуществляли с помощью электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояния. Результаты обобщения математического моделирования и графического отображения, представленные в виде диаграмм состав – свойство, позволили количественно оценить влияние основности шлака и содержания B_2O_3 на вязкость получаемой оксидной системы. Шлаки оксидной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , характеризуются достаточно низкой вязкостью в интервале температур 1450 – 1500 °С. Вязкость таких шлаков значительно увеличивается при снижении температур до 1400 °С. Установлено, что шлаки основностью 2 – 5, содержащие 1 – 4 % B_2O_3 , характеризуются при постоянных концентрациях Al_2O_3 (15 %) и MgO (8 %) высокой жидкоподвижностью, их вязкость в диапазоне температур 1450 – 1500 °С не превышает 4 – 7 Пз. Такие шлаки обладают, как правило, высокими рафинирующими свойствами и могут быть рекомендованы для формирования на установке ковш-печь.

Ключевые слова: борсодержащие шлаки, основность, вязкость, планирование эксперимента, диаграммы состав – вязкость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-601-605

Требования к качеству стали постоянно ужесточаются, сопровождаясь необходимостью сокращения материальных и энергетических затрат. Одним из направлений решения проблемы является глубокая десульфурация металла [1 – 12], во многом определяемая физико-химическими свойствами оксидных систем.

Исследование физико-химических свойств многокомпонентных металлургических расплавов наиболее удобно осуществлять по многофакторным аналитическим зависимостям, связывающим изучаемые свойства с содержанием компонентов в расплаве, либо на основе результатов графического отображения указанных зависимостей в виде диаграмм состав – свойство. Однако построение таких диаграмм является довольно сложной и трудоемкой процедурой, сопряженной с постановкой и проведением в определенной последовательности огромного числа опытов [13, 14]. Перспективным направ-

лением решения проблемы является использование математических методов планирования эксперимента, применение которых позволяет существенно сократить число опытов и увеличить информативность эксперимента, получив результаты с достаточно высокой степенью достоверности [13 – 19].

Для решения задач физико-химического анализа разработаны специальные методы планирования экспериментов, в частности метод симплексных решеток [13, 14, 16 – 19], позволяющий построить математические модели, описывающие изучаемое свойство в зависимости от концентрации компонентов системы в виде полинома некоторой степени.

В настоящей работе с использованием метода симплексных решеток построены диаграммы состав – вязкость шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , и приведены результаты анализа влияния основности и содержания оксида B_2O_3 в шлаке на вязкость изучаемой оксидной системы.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-19-10435).

Для исследования вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , использовали симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента, сущность которого заключается в построении математических моделей, описывающих зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции с последующим графическим отображением результатов математического моделирования в виде диаграмм состав – свойство [13, 14, 16 – 19]. При построении матрицы планирования эксперимента на переменные составляющие исследуемой оксидной системы наложены следующие ограничения: $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2 - 5$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 1 - 4$ %; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15$ %; $\text{MgO} = 8$ %. Исследованная область шлаков в системе $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3 - 15$ % $\text{Al}_2\text{O}_3 - 8$ % MgO представлена в виде локального симплекса двумя концентрационными треугольниками $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, вершинами которого являются псевдокомпоненты Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 . Математическая модель, описывающая связь температуры при заданной вязкости с составом оксидной системы, была выбрана в виде приведенного полинома III степени, обеспечивающего охват всего факторального пространства локального симплекса 16 экспериментальными точками.

Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам $Y_1 - Y_4$ изучаемого локального симплекса, выплавляли в соответствии с методикой, описанной в работе [17]. Экспериментальные составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса.

Вязкость шлаков измеряли в молибденовых тиглях с помощью электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояния. Температуру шлака фиксировали с помощью термодпары ПР 30/6. Химические составы получаемых шлаков в координатах псевдокомпонентов (в долях единиц) и исходных компонентов (в % по массе), а также значения вязкости при температурах 1400, 1450 и 1500 °С приведены в матрице планирования (см. таблицу).

Для каждого значения вязкости в точках плана локального симплекса были получены математические модели в виде приведенного полинома III степени, описывающие зависимость температуры для заданной вязкости от состава шлака. Коэффициенты полиномов были рассчитаны по формулам, приведенным в работе [13].

Графическое отображение результатов математического моделирования проводили в два этапа. На первом этапе для каждого значения вязкости строили диаграммы, в которых изображались изотермы линий заданной постоянной вязкости. Затем путем совмещения соответствующих изотерм, снимаемых со всех диаграмм постоянной вязкости, получали диаграммы состав – вязкость для исследуемого диапазона температур.

Анализ приведенных на рисунке диаграмм состав – вязкость позволил впервые количественно оценить влияние температуры, основности шлака и содержания

Матрица планирования эксперимента

Matrix of experiment planning

Номер смеси	Индекс шлака	В координатах псевдокомпонентов				Химический состав шлака, % (по массе)					Вязкость, Пз, при $T, ^\circ\text{C}$		
		x_1	x_2	x_3	x_4	CaO	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	1400	1450	1500
1	Y_1	1	0	0	0	50,7	25,3	1	15	8	4,5	2,7	1,9
2	Y_2	0	1	0	0	63,3	12,7	1	15	8	20,4	8,0	5,0
3	Y_3	0	0	1	0	60,8	12,2	4	15	8	13,5	4,4	3,3
4	Y_4	0	0	0	1	48,7	24,3	4	15	8	3,4	2,2	1,4
5	Y_{12}	0,33	0,67	0	0	60,8	15,2	1	15	8	10,0	4,1	2,7
6	Y_{13}	0,33	0	0,67	0	59,2	14,8	3	15	8	16,0	6,0	3,5
7	Y_{21}	0	0,33	0,67	0	61,7	12,3	3	15	8	18,7	7,0	4,2
8	Y_{22}	0,67	0,33	0	0	57,0	19,0	1	15	8	16,4	5,1	3,7
9	Y_{31}	0,67	0	0,33	0	56,3	18,7	2	15	8	12,1	3,3	2,2
10	Y_{32}	0	0,67	0,33	0	62,5	12,5	2	15	8	6,2	2,8	2,0
11	Y_{41}	0,33	0,33	0,33	0	60,0	15,0	2	15	8	4,8	2,5	1,6
12	Y_{42}	0,33	0	0	0,67	49,3	24,7	3	15	8	3,9	2,4	1,5
13	Y_{121}	0	0	0,67	0,33	58,4	14,6	4	15	8	8,0	3,7	2,4
14	Y_{122}	0,67	0	0	0,33	50,0	25,0	2	15	8	7,9	3,3	2,2
15	Y_{131}	0	0	0,33	0,67	54,8	18,2	4	15	8	14,8	5,0	3,2
16	Y_{132}	0,33	0	0,33	0,33	55,5	18,5	3	15	8	13,6	4,5	3,0

оксида B_2O_3 на вязкость системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO .

Шлаки оксидной системы характеризуются достаточно низкой вязкостью в интервале температур 1450–1500 °С, которая значительно увеличивается при снижении температур до 1400 °С. При температуре 1400 °С вязкость шлаков основностью 2,0–3,0, содержащих 1–4 % B_2O_3 , изменяется в пределах 4–10 Пз (см. поз. а рисунка). Повышение температуры до 1450 °С при фиксированной основности 2,0–3,0 сопровождается снижением вязкости шлака, которая не превышает 3–4 Пз при содержании 1–4 % B_2O_3 . Смещение шлаков в область основности 4,0–5,0 сопровождается увеличением вязкости до 5–7 Пз при содержании 1–3 % B_2O_3 (см. поз. б рисунка). При температуре 1500 °С вязкость шлаков, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , в изучаемом диапазоне основности 2,0–5,0 изменяется в пределах 2–4 Пз при содержании 1–4 % B_2O_3 (см. поз. в рисунка).

Таким образом, обобщение результатов выполненных исследований, представленных в виде диаграмм состав – свойство, позволило количественно оценить влияние основности шлака и содержания оксида B_2O_3 на вязкость изучаемой оксидной системы. Установлено, что шлаки основностью 2,0–5,0, содержащие 1–4 % B_2O_3 , характеризуются при постоянных концентрациях Al_2O_3 (15 %) и MgO (8 %) низкой вязкостью, не превышающей 4–7 Пз в диапазоне температур 1450–1500 °С. Такие шлаки обладают, как правило, высокими рафинирующими свойствами [20] и могут быть рекомендованы для их формирования на установке ковш-печь.

Выводы. Анализ диаграмм состав – вязкость, построенных с использованием метода симплексных решеток планирования эксперимента, позволил получить новые данные о вязкости шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , в широком диапазоне химического состава и температур. Шлаки основностью 2,0–5,0, содержащие 1–4 % B_2O_3 , характеризуются в диапазоне температур 1450–1500 °С низкой вязкостью, не превышающей 4,0–7,0 Пз. Такие шлаки обладают высокими рафинирующими свойствами и могут быть рекомендованы для их формирования на установках ковш-печь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 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 сталеплавателей. – М.: АО «Черметинформация», 2001. С. 63–66.
3. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 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. Vol. 51. № 5. P. 702–708.
5. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J., Guo M., Blanpain B. Desulphurisation of Stainless Steel by Using $CaO-Al_2O_3$ Based Slags during

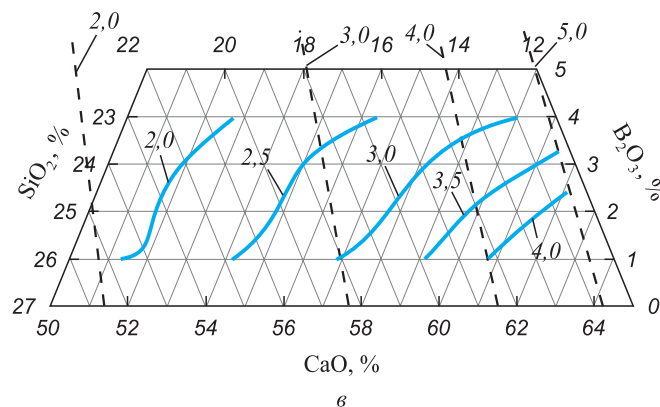
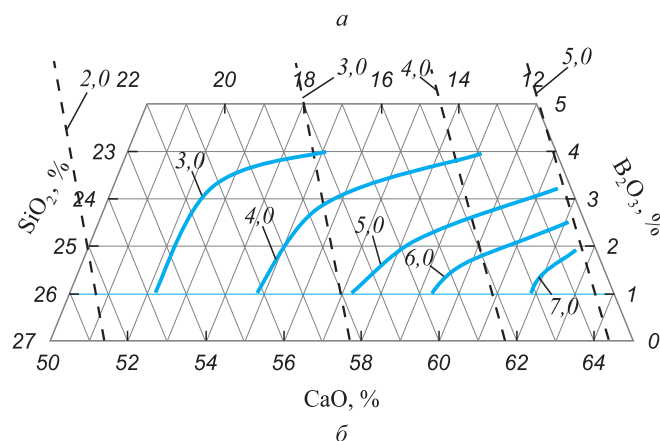
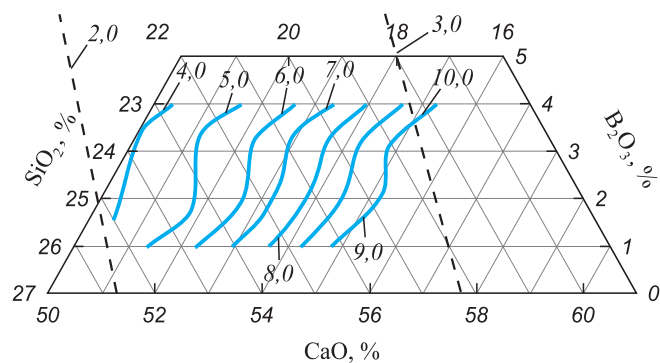


Диаграмма вязкости шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 8 % MgO и 15 % Al_2O_3 при 1400 °С (а), 1450 °С (б) и 1500 °С (в) (сплошные линии – вязкость, Пз; штриховые – основность)

Viscosity diagram of slags of $CaO-SiO_2-B_2O_3$ system containing 8 % MgO and 15 % Al_2O_3 at 1400 °С (а), 1450 °С (б) and 1500 °С (в) (solid lines – viscosity, P; dashed – basicity)

- Secondary Metallurgy // ISIJ International, 2013. Vol. 53. No. 3. P. 459–467.
6. Hui-xiang Yu, Xin-hua Wang, Mao Wang, Wan-jun Wang Desulfurization ability of refining slag with medium basicity // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2014. Vol. 21. No. 12. P. 1160–1166.
7. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulphurisation technology in ladle furnace at KSC // Ironmaking and Steelmaking. 2003. Vol. 30. No. 2. P. 116–119.
8. Nurhudin, Maulud Hidayat, Windu Basuki Deep desulfurization process for producing ultra-low sulfur steel at PT Krakatau steel // SEAISI Quarterly. 2004. Vol. 33. No. 2. P. 29–34.
9. Hongming W., Guirong L., Bo L., Xue-jun Z., Yong-qi Y. Effect of B_2O_3 on Melting temperature of CaO -Based Ladle Refining Slag // ISIJ International. 2010. Vol. 17. No. 10. P. 18–22.

10. Zhang L., Zhi J., Mei F. etc. Basic oxygen furnace based steelmaking processes and cleanliness control at Baosteel // *Ironmaking and Steelmaking*. 2006. Vol. 33. No. 2. P. 129 – 139.
11. Wang H.M., Li G.R., Dai Q.X. etc. Effect of Additives on Viscosity of LATS Refining Ladle Slag // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 5. P. 637 – 640.
12. Kang Y.J., Yu L., Du S.C. Study of inclusion removal mechanism around open eye in ladle treatment // *Ironmaking and Steelmaking*. 2007. Vol. 34. No. 3. P. 253 – 261.
13. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков: Методическое пособие / В.А. Ким, Э.И. Николай, А.А. Акбердин, И.С. Куликов. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 116 с.
14. Scheffé H. Experiments with mixtures // *J. Roy Stat. Soc. Ser. B*. 1958. Vol. 20. P. 344 – 36.
15. Налимов В.В. Теория эксперимента // В кн.: Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: Наука, 1969. С. 9 – 20.
16. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С. и др. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1980. № 9. С. 167.
17. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А., Сычев А.В., Уполовникова А.Г. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$ // *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 48. № 11. С. 40 – 44.
18. Бабенко А.А., Жучков В.И., Уполовникова А.Г., Кель И.Н. Изучение вязкости шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - 25\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 820 – 825.
19. Бабенко А.А., Жучков В.И., Сычев А.В., Рябов В.В., Уполовникова А.Г. Построение диаграмм вязкости шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO} - 4\% \text{B}_2\text{O}_3$ методом симплексных решеток // *Металлы*. 2017. № 3. С. 17 – 20.
20. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г., Сельменских Н.И., Сычев А.В. Формирование основных бор-содержащих шлаков – перспективное направление внепечной десульфурации и прямого микролегирования низкоуглеродистой стали бором // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2017. № 9 (1413). С. 50 – 54.

Поступила 20 апреля 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 8, pp. 601–605.

APPLICATION OF SIMPLEX LATTICE METHOD FOR COMPOSITION-VISCOSITY PLOTTING OF $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ SLAGS WITH 15 % Al_2O_3 AND 8 % MgO

A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, A.G. Upolovnikova, V.V. Ryabov

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-601-605

Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

REFERENCES

Abstract. The results of composition-viscosity plotting for slag of the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ system containing 15 % of Al_2O_3 and 8 % of MgO using simplex lattice method are given in this paper. It allows obtaining mathematical models describing property dependence on composition as a continuous function. The study was subjected to a fixed area in a form of local simplex represented by two $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ concentration triangles. The experiment was planned in pseudo-component coordinates. To describe dependence of slag viscosity on its composition, a mathematical model of polynomial of the third degree was chosen. In experiment planning matrix, slag compositions are given in pseudo-components and original components coordinates. Slags corresponding to studied local simplex vertex composition were melted in graphite crucibles from pre-heated oxides of ChDA brand. Composition of slag, corresponding to the points of local simplex plan, was obtained by counter-mixing of simplex vertex slag. In experiments, molybdenum crucibles were used to measure slags viscosity. Measurements were carried out using an electric vibrational viscometer in an argon flow with continuous cooling of melt from homogeneous-liquid to solid state. The results of generalization of mathematical modeling and graphical representation presented in form of composition-property diagrams made it possible to quantify effect of slag basicity and B_2O_3 content on viscosity of resulting oxide system. The slag of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ oxide system, containing 15 % of Al_2O_3 and 8 % of MgO , is characterized by sufficiently low viscosity in temperature range of 1450 – 1500 °C. Viscosity of such slags increases significantly with temperatures decrease to 1400 °C. It has been established that slags with basicity of 2 to 5, containing 1 to 4 % of B_2O_3 , are characterized by high liquid mobility at constant concentrations of Al_2O_3 (15 %) and MgO (8 %), their viscosity in temperature range of 1450 – 1500 °C does not exceed 4 – 7 poise. Such slags have, as a rule, high refining properties and can be recommended for the formation on a ladle furnace installation.

Keywords: boron containing slags, basicity, viscosity, experiment planning, composition – viscosity chart.

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Steel production. Vol. 3. Out-of-furnace metallurgy of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
2. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D. Concept of production of low-sulfur steels at OJSC Severstal taking into account the technological aspects. In: *Trudy VI kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the 6th Congress of Steel-smelters]. Moscow: AO "Chermetinformatsiya", 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
3. Sokolov G.A. *Vnepechnoye rafinirovaniye stali* [Out-of-furnace 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. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J., Guo M., Blanpain B. Desulfurization of stainless steel by using $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ based slags during secondary metallurgy. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 3, pp. 459–467.
6. Hui-xiang Yu, Xin-hua Wang, Mao Wang, Wan-jun Wang Desulfurization ability of refining slag with medium basicity. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2014, vol. 21, no. 12, pp. 1160–1166.
7. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulfurization technology in ladle furnace at KSC. *Ironmaking and Steelmaking*. 2003, vol. 30, no. 2, pp. 116–119.
8. Nurhudin, Maulud Hidayat, Windu Basuki Deep desulfurization process for producing ultra-low sulfur steel at PT Krakatau steel. *SEAIIS Quarterly*. 2004, vol. 33, no. 2, pp. 29–34.
9. Hongming W., Guirong L., Bo L., Xue-jun Z., Yong-qi Y. Effect of B_2O_3 on melting temperature of CaO -based ladle refining slag. *ISIJ International*. 2010, vol. 17, no. 10, pp. 18–22.
10. Zhang L., Zhi J., Mei F. etc. Basic oxygen furnace based steelmaking processes and cleanliness control at Baosteel. *Ironmaking and Steelmaking*. 2006, vol. 33, no. 2, pp. 129–139.
11. Wang H.M., Li G.R., Dai Q.X. etc. Effect of additives on viscosity of LATS refining ladle slag. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 5, pp. 637–640.

12. Kang Y.J., Yu L., Du S.C. Study of inclusion removal mechanism around open eye in ladle treatment. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, no. 3, pp. 253–261.
13. Kim V.A., Nikolai E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoistv metallurgicheskikh shlakov: Metodicheskoe posobie* [Planning of experiment at the study of physical-chemical properties of metallurgical slags: Manual]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
14. Scheffé H. Experiments with mixtures. *J. Roy Stat. Soc. B*. 1958, vol. 20, pp. 344–360.
15. Nalimov V.V. Theory of experiment. In: *Novyye idei v planirovanii eksperimenta* [New ideas in the planning of the experiment]. Moscow: Nauka, 1969, pp. 9–20. (In Russ.).
16. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. The use of simplex lattices method for charting structure – viscosity diagrams. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167, 168. (In Russ.).
17. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Upolovnikova A.G. The use of the simplex lattice method for constructing the composition-viscosity diagrams of the slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$ system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016, vol. 48, no. 11, pp. 40–44. (In Russ.).
18. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Upolovnikova A.G., Kel' I.N. Study of the viscosity of slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - 25\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ system. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 820–825. (In Russ.).
19. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Ryabov V.V., Upolovnikova A.G. Construction of diagrams of slag viscosity of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO} - 4\% \text{B}_2\text{O}_3$ system by the simplex lattice method. *Metally*. 2017, no. 3, pp. 17–20. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Selmenskikh N.I., Sychev A.V. Formation of basic boron-containing slags as a promising direction for out-of-furnace desulfurization and direct micro-alloying of low-carbon steel with boron. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, no. 9 (1413), pp. 50–54. (In Russ.).

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the RNF grant (project no. 16-19-10435).

Information about the authors:

A.A. Babenko, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (babenko251@gmail.com)
V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher (ntm2000@mail.ru)
A.G. Upolovnikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
V.V. Ryabov, Research Associate

Received April 20, 2018