



Оригинальная статья

УДК 669.15-198:541.124

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-353-359



## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ ИЗ РАСПЛАВА $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$ СМЕСЯМИ $CO - CO_2$ И $H_2 - H_2O$

А. С. Вусихис<sup>1</sup>, Л. И. Леонтьев<sup>1,2,3</sup>, Е. Н. Селиванов<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)<sup>3</sup> Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

**Аннотация.** Для прогнозирования условий восстановления металлов из оксидного расплава газом в барботажных процессах разработана методика термодинамического моделирования, обеспечивающая приближение к реальным системам. Основное отличие принятой методики от известных заключается в проведении последовательных расчетных циклов с выводом из состава рабочего тела образовавшихся газов и металлической фазы. В представленной работе приведены результаты термодинамического моделирования процессов восстановления никеля и железа из расплавов  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  смесями  $CO - CO_2$  и  $H_2 - H_2O$ , содержащими 0 – 60 %  $CO_2$  ( $H_2O$ ) в интервале температур 1273 – 1673 К. В ходе расчетов оценивали содержание оксидов никеля и железа в расплаве и степень их восстановления. Показано, что независимо от состава газа этот процесс протекает в несколько этапов. На первом этапе происходит восстановление  $Fe_2O_3$  до  $Fe_3O_4$  и  $FeO$ . Значения  $C_{Fe_2O_3}$  уменьшаются почти до нуля, одновременно увеличиваются  $C_{Fe_3O_4}$  и  $C_{FeO}$ . К концу этапа  $C_{Fe_3O_4}$  достигает максимального значения. На втором этапе происходит переход  $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ , когда значения  $C_{FeO}$  достигают максимума, никель и железо начинают восстанавливаться до металла. При восстановлении смесью  $CO - CO_2$  повышение температуры уменьшает металлизацию как никеля, так и железа. Аналогично влияет увеличение содержания  $CO_2$  во вводимом газе. В процессе взаимодействия оксидного расплава с газом, содержащим 60 %  $CO_2$ , третий этап отсутствует. При восстановлении смесью  $H_2 - H_2O$  повышение температуры уменьшает металлизацию никеля, но увеличивает железа. С ростом содержания во вводимом газе паров воды снижается степень металлизации как никеля, так и железа. Полученные данные полезны для создания технологий селективного восстановления металлов и формирования ферроникеля требуемого состава.

**Ключевые слова:** методика, термодинамическое моделирование, кинетика, восстановительный газ, барботаж, многокомпонентный оксидный расплав, никель, железо

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-29-24093.

**Для цитирования:** Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  смесями  $CO - CO_2$  и  $H_2 - H_2O$  // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 353–359.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-353-359>

Original article

## THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$ MELT BY $CO - CO_2$ AND $H_2 - H_2O$ MIXTURES

A. S. Vusikhis<sup>1</sup>, L. I. Leont'ev<sup>1,2,3</sup>, E. N. Selivanov<sup>1</sup><sup>1</sup> Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)<sup>2</sup> National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)<sup>3</sup> Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

**Abstract.** To predict the conditions for metals reduction from an oxide melt by gas in bubbling processes, a thermodynamic modeling technique has been developed that provides an approximation to real systems. The main difference between the accepted method and the well-known one is in conducting successive calculation cycles with withdrawal of the generated gases and the metal phase from the working medium. This paper presents the results of thermodynamic modeling of nickel and iron reduction processes from  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  melts by mixtures of  $CO - CO_2$  and  $H_2 - H_2O$  containing 0 – 60 %  $CO_2$  ( $H_2O$ ) in the temperature range of 1273 – 1673 K. The calculations evaluated the content of nickel and iron oxides in the melt and the degree of their reduction. It is shown that, regardless of the gas composition, this process proceeds in several stages. At the first stage,  $Fe_2O_3$  is reduced to  $Fe_3O_4$  and  $FeO$ .  $C_{Fe_2O_3}$  values decrease to almost zero, while  $C_{Fe_3O_4}$  and  $C_{FeO}$  increase simultaneously. By the end of the phase,  $C_{Fe_3O_4}$  reaches

its maximum value. At the second stage, the  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$  transition occurs, when  $C_{\text{FeO}}$  values reach maximum, nickel and iron begin to reduce to metal. At reduction by  $\text{CO}-\text{CO}_2$  mixture, an increase in temperature reduces the metallization of both nickel and iron. Similarly, an increase in the  $\text{CO}_2$  content of the introduced gas affects. During interaction of the oxide melt with a gas containing 60 %  $\text{CO}_2$ , the third stage is absent. At reduction by  $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$  mixture, an increase in temperature reduces the metallization of nickel, but increases metallization of iron. With increasing water vapor content in the introduced gas, the degree of metallization of both nickel and iron decreases. The obtained data are useful for creating technologies for selective reduction of metals and formation of ferronickel of the required composition.

**Keywords:** methodology, thermodynamic modeling, kinetics, reducing gases, bubbling processing, multicomponent oxide melts, nickel, iron

**Funding:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-29-24093.

**For citation:** Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{NiO}$  melt by  $\text{CO}-\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$  mixtures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 353–359. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-353-359>

Технологии, в основе которых лежат барботажные процессы, широко распространены в черной [1–4] и цветной [5–10] металлургии. В связи с этим изучению этих процессов, в частности барботажного восстановления металлов из оксидных расплавов, посвящено большое количество исследований [11–14]. Следует отметить, что в подавляющем большинстве работ рассматривали неравновесные процессы. В связи с этим, для одних и тех же расплавов, в зависимости от параметров эксперимента, кинетические параметры процесса могут быть различными. В реальных условиях барботажного процесса полнота взаимодействия определяется продолжительностью нахождения газа в расплаве, его физико-химическими свойствами (вязкость, плотность и поверхностное натяжение), глубиной погружения фурмы, параметрами газовой струи [15]. При значительном погружении фурмы, малых размерах формирующихся пузырей и высокой вязкости расплава состав отходящих газов, образующихся в ходе взаимодействия газа с компонентами расплава, близок к равновесному [16]. В этом случае, при высокой интенсивности перемешивания расплава, взаимодействие газа с расплавом будет приближено к равновесному, определяемому термодинамическими свойствами системы. Тем самым создаются условия для количественного описания барботажных процессов и минимизации экспериментальных работ [17, 18].

Методы термодинамического моделирования (ТДМ) широко используют при решении теоретических и прикладных задач совершенствования металлургических технологий [19–23]. Однако существующие методологии ТДМ предназначены для анализа равновесия в замкнутых системах и позволяют прогнозировать составы равновесных фаз и проследить равновесное распределение компонентов по продуктам в широких температурных интервалах. Предложена методика [17, 18], позволяющая использовать ТДМ для описания процессов восстановления металлов при барботаже газом многокомпонентных оксидных расплавов в приближении к реальным системам. Основное отличие принятой методики от известных заключается в проведении последовательных расчетных циклов с выводом из состава рабочего тела образовавшихся газов и металлической фазы. Применение методики

к действующим и разрабатываемым технологиям позволяет определять, в зависимости от количества введенного газа-восстановителя ( $V_g$ ), следующие величины: содержание оксидов ( $C_{\text{MeO}}$ ) в шлаке и металлов ( $C_{\text{Me}}$ ) в сплавах, коэффициенты перехода компонентов в элементное состояние ( $\varphi_{\text{Me}}$ ) и распределение элементов. Особенность методики состоит в том, что равновесие определяют для каждой единичной порции газа, вводимой в рабочее тело, а содержание оксидов восстанавливаемых металлов в каждом расчетном цикле принимают из предшествующих данных. Этот подход позволяет моделировать процессы и качественно оценить полноту протекания реакций в пирометаллургических агрегатах, использующих барботаж расплава газом-восстановителем.

В представленной работе приведены результаты моделирования совместного восстановления никеля и железа в системе  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{NiO}$  смесями  $\text{CO}-\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$  при различных температурах. Соотношение  $\text{B}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  в исходном рабочем теле принято равным 3,0, а содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{NiO}$  – 20 и 2 % (по массе) соответственно. Расчеты проведены для интервала температур 1473–1673 К и давления 0,1 МПа. Каждый единичный цикл расчета включал добавку порции газа 7,2  $\text{дм}^3/\text{кг}$ . Содержание  $\text{CO}$  в смесях  $\text{CO}-\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в  $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$  меняли от 40 до 100 %. Для упрощения расчетов принято, что оксидная и металлическая фазы являются идеальными растворами.

В ходе моделирования принимали во внимание такие параметры, как содержание оксидов железа ( $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ ,  $C_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$ ,  $C_{\text{FeO}}$ ) и никеля ( $C_{\text{NiO}}$ ) в оксидном расплаве, текущее ( $C'_{\text{Ni}}$ ) и суммарное ( $C_{\text{Ni}}$ ) содержание никеля в образовавшемся сплаве, а также степень металлизации по железу ( $\varphi_{\text{Fe}}$ ) и никелю ( $\varphi_{\text{Ni}}$ ). Последние принимали как отношение количества восстановленного до металлического состояния к находящемуся в исходном рабочем теле железа или никеля, выраженное в процентах. Выявленные показатели сопоставляли с количеством введенного газа ( $V_g$ ,  $\text{дм}^3/\text{кг}$ ).

Как следует из полученных данных (рис. 1), процесс восстановления протекает поэтапно: первоначально оксиды железа переходят в низшее валентное состояние, а затем образуется металлический никель. Моделирование процесса в газовой среде из монооксида углерода

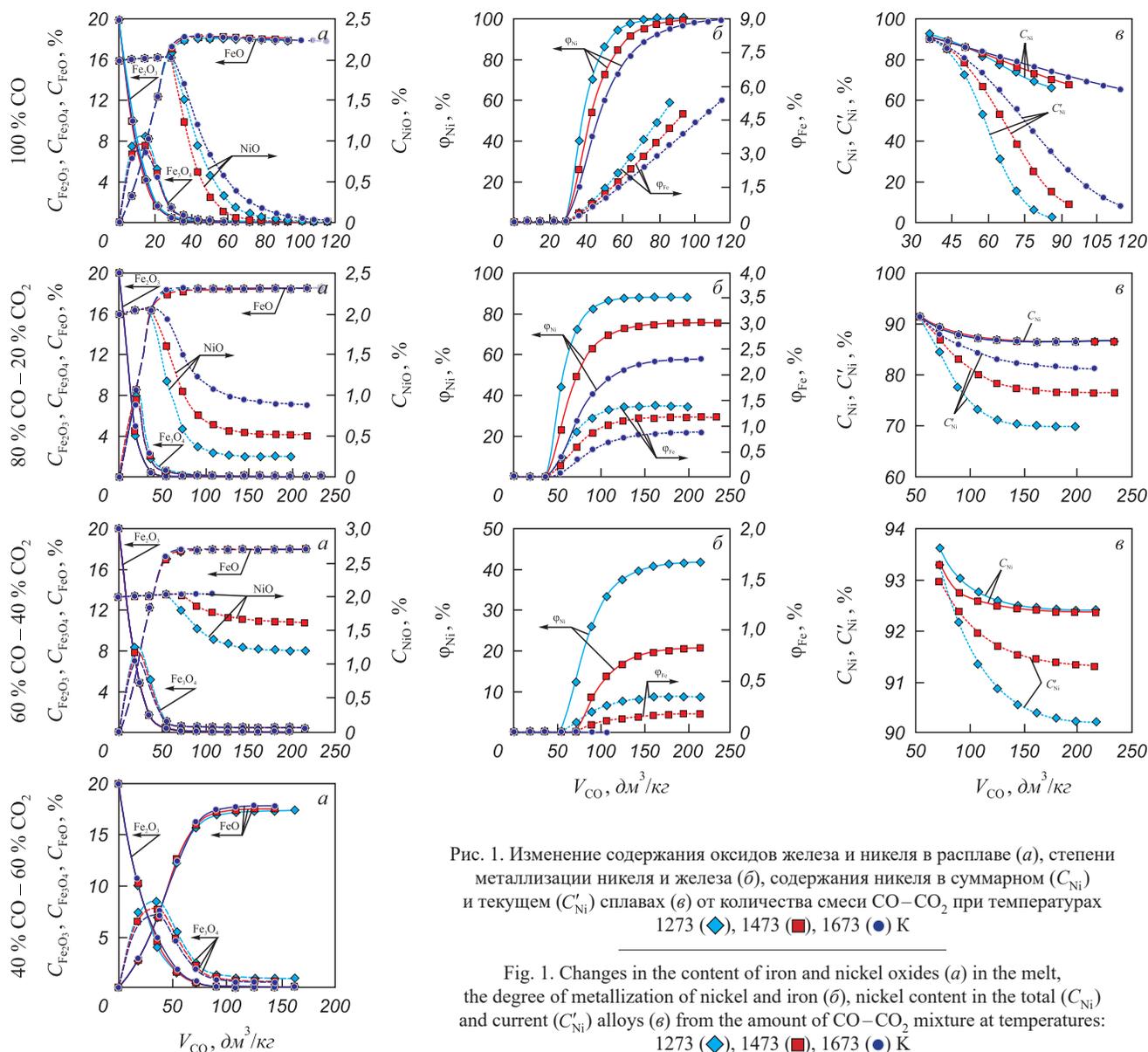


Рис. 1. Изменение содержания оксидов железа и никеля в расплаве (а), степени металлизации никеля и железа (б), содержания никеля в суммарном ( $C_{Ni}$ ) и текущем ( $C'_{Ni}$ ) сплавах (в) от количества смеси CO–CO<sub>2</sub> при температурах 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) К

Fig. 1. Changes in the content of iron and nickel oxides (a) in the melt, the degree of metallization of nickel and iron (b), nickel content in the total ( $C_{Ni}$ ) and current ( $C'_{Ni}$ ) alloys (в) from the amount of CO–CO<sub>2</sub> mixture at temperatures: 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) K

показывает, что для полного перевода Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в FeO, при исходном значении  $C_{Fe_2O_3}$ , равном 20 %, необходимо ввести газ в количестве около 30 дм<sup>3</sup>/кг. Для последующего перевода никеля в металлическое состояние необходимо вводить около 50 дм<sup>3</sup>/кг CO. Важно отметить, что на стадии восстановления оксидов железа до двухвалентного состояния температура практически не влияет на процесс, в то время как при переводе никеля и железа в металл она имеет значимое влияние. Причем, по значениям  $C_{Ni}$ ,  $\phi_{Ni}$  и  $\phi_{Fe}$  лучшие показатели достигнуты при пониженных температурах.

В связи с тем, что степень восстановления никеля приближается к 100 %, в то время как этот показатель для железа не превышает 6 %, удастся выделить сплав с 60 – 90 % Ni. На начальной стадии восстановления никеля  $C_{Ni}$  и  $C'_{Ni}$  близки между собой. При более высоких степенях восстановления доля оксида никеля в расплаве снижается, что влияет на значения  $C_{Ni}$  и  $C'_{Ni}$ . В каждом текущем расчетном цикле

величина  $C'_{Ni}$  снижается и приближается к нулю при практически полном восстановлении никеля. Выделяемый металл на этой стадии представлен металлическим железом.

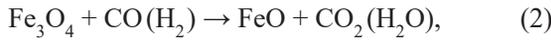
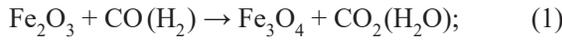
Снижение содержания монооксида углерода во водимом газе заметно меняет как равновесные содержания  $C_{Ni}$  и  $C'_{Ni}$ , так и полноту восстановления металлов. Ведение в рабочее тело 180 дм<sup>3</sup>/кг смеси 80 % CO – 20 % CO<sub>2</sub> позволяют достичь следующих степеней восстановления металлов:

Температура, К	1273	1473	1673
$\phi_{Ni}$ , %	94,8	94,6	94,0
$\phi_{Fe}$ , %	2,3	3,1	3,6

Дальнейшее уменьшение доли монооксида углерода в газовой смеси сопровождается снижением значений  $\phi_{Ni}$  и  $\phi_{Fe}$ . Уже при 40 % CO в газовой смеси образования металлов не происходит.

Взаимодействие оксидов никеля и железа системы  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--CaO--Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO}$  с водородом (рис. 2) в принципе не меняет закономерностей, выявленных для  $\text{CO}$ . В обоих случаях процесс можно разделить на три этапа: первоначально происходит снижение значения  $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ , но увеличение  $C_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$  и  $C_{\text{FeO}}$ , затем снижение  $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$  и  $C_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$  с ростом  $C_{\text{FeO}}$ , и лишь после этого образование металлов, сопровождающееся снижением  $C_{\text{NiO}}$  и  $C_{\text{FeO}}$ .

На первоначальных этапах протекают реакции:



ведущие к некоторому уменьшению массы расплава, что при сохранении массы оксида никеля повышает значение  $C_{\text{NiO}}$ . На восстановление высших оксидов железа до двухвалентного состояния требуется примерно одинаковое количество  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

Температура мало влияет на рассматриваемые показатели процесса на начальных этапах восстановления оксидов железа до  $\text{FeO}$ , но существенно – в период образования металлов. Отличия состоят в том, что водород как более активный восстановитель обеспечивает необходимые значения  $\varphi_{\text{Ni}}$  и  $\varphi_{\text{Fe}}$  при меньших величинах  $V_{\text{H}_2}$ . Кроме того, даже использование смесей  $\text{H}_2\text{--H}_2\text{O}$  с низкой долей водорода (40 %) не прекращает

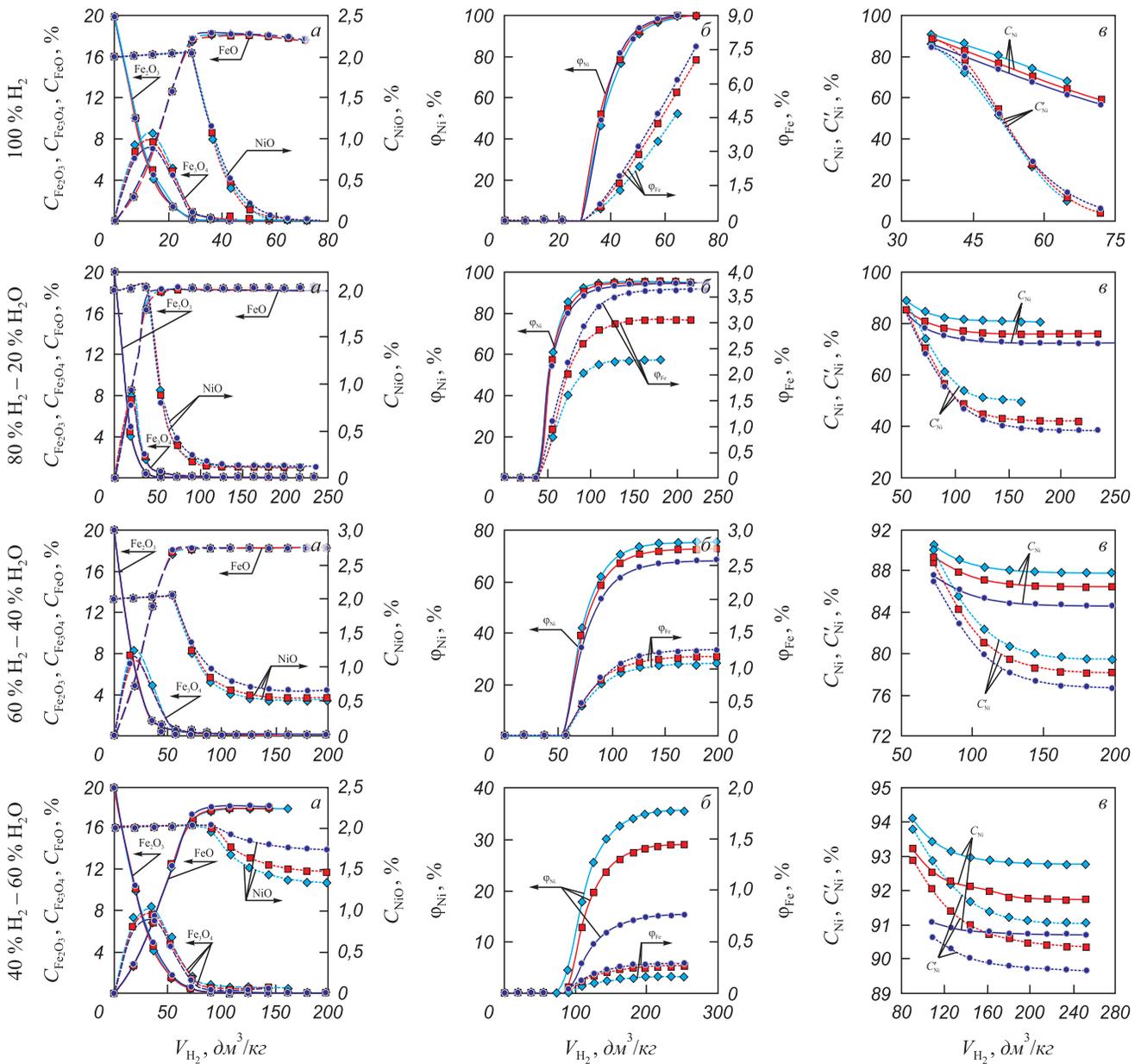


Рис. 2. Изменение содержания оксидов железа и никеля в расплаве (а), степени металлизации никеля и железа (б), содержания никеля в суммарном ( $C_{\text{Ni}}$ ) и текущем ( $C'_{\text{Ni}}$ ) сплавах (в) от количества смеси  $\text{H}_2\text{--H}_2\text{O}$  при температурах 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) К

Fig. 2. Changes in the content of iron and nickel oxides (a) in the melt, the degree of metallization of nickel and iron (б), nickel content in the total ( $C_{\text{Ni}}$ ) and current ( $C'_{\text{Ni}}$ ) alloys (в) from the amount of  $\text{H}_2\text{--H}_2\text{O}$  mixture at temperatures: 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) K

восстановление металлов, хотя значения  $\varphi_{Ni}$  и  $\varphi_{Fe}$  заметно снижаются.

К заключительному циклу расчетов (табл. 1, 2) состояние системы  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  характеризуется практически полным переходом оксидов железа

в низшее валентное состояние: остаточное содержание  $Fe^{3+}$ , определяемое величинами  $C_{Fe_2O_3}$  и  $C_{Fe_3O_4}$ , составляет доли процента. Снижение парциального давления газа-восстановителя ( $CO$  или  $H_2$ ) в рабочем теле существенно сказывается на достигаемых показателях.

Таблица 1

**Равновесные параметры системы  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  после обработки смесями  $CO - CO_2$ , отвечающие заключительному циклу расчетов**

*Table 1. Equilibrium parameters of  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  system after treatment by  $CO - CO_2$  mixtures, corresponding to the final calculation cycle*

$CO_{исх}, \%$	$T, K$	$V_g, \text{дм}^3/\text{кг}$	$C_{Fe_2O_3}, \%$ (по массе)	$C_{Fe_3O_4}, \%$ (по массе)	$C_{FeO}, \%$ (по массе)	$C_{NiO}, \%$ (по массе)	$\varphi_{Ni}, \%$	$\varphi_{Fe}, \%$	$C_{Ni}, \%$ (по массе)	$CO_{кон}, \%$
100	1273	86	0,01	0,051	17,8	0,00	99,9	5,2	66,0	93,0
	1473	94	0,01	0,033	17,9	0,015	99,3	4,8	67,9	94,1
	1673	115	0,01	0,012	17,9	0,018	99,1	5,4	65,1	95,2
80	1273	198	0,03	0,18	18,3	0,25	88,0	1,4	86,5	80,0
	1473	234	0,03	0,14	18,3	0,51	75,4	1,2	86,6	80,0
	1673	252	0,03	0,11	18,3	0,87	57,9	0,9	87,0	80,0
60	1273	216	0,09	0,41	18,0	1,21	41,5	0,4	92,4	60,0
	1473	220	0,09	0,36	17,9	1,63	20,6	0,2	92,4	60,0
	1673	108	0,08	0,27	18,1	2,04	0,0	0	0	60,0
40	1273	144	0,19	0,95	17,4	2,04	0,0	0	0	40,0
	1473	144	0,18	0,75	17,5	2,04	0,0	0	0	40,0
	1673	162	0,17	0,57	17,7	2,04	0,0	0	0	40,0

Таблица 2

**Равновесные параметры системы  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  после обработки смесями  $H_2 - H_2O$ , отвечающие заключительному циклу расчетов**

*Table 2. Equilibrium parameters of  $B_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 - NiO$  system after treatment by  $H_2 - H_2O$  mixtures, corresponding to the final calculation cycle*

$H_{2исх}, \%$	$T, K$	$V_g, \text{дм}^3/\text{кг}$	$C_{Fe_2O_3}, \%$ (по массе)	$C_{Fe_3O_4}, \%$ (по массе)	$C_{FeO}, \%$ (по массе)	$C_{NiO}, \%$ (по массе)	$\varphi_{Ni}, \%$	$\varphi_{Fe}, \%$	$C_{Ni}, \%$ (по массе)	$H_{2кон}, \%$
100	1273	72	0,01	0,06	17,7	0,003	99,9	6,0	62,8	88,9
	1473	72	0,01	0,03	17,5	0,006	99,7	7,1	58,8	87,3
	1673	72	0,01	0,02	17,4	0,01	99,5	7,6	56,9	86,4
80	1273	180	0,02	0,11	18,3	0,11	94,8	2,3	80,5	80,0
	1473	298	0,01	0,06	18,2	0,11	94,6	3,1	75,8	80,0
	1673	216	0,01	0,03	18,1	0,12	94,1	3,6	72,4	80,0
60	1273	198	0,04	0,20	18,3	0,51	75,3	1,1	87,9	60,0
	1473	198	0,04	0,15	18,3	0,56	73,0	1,1	86,5	60,0
	1673	216	0,03	0,08	18,3	0,66	68,3	1,3	84,6	60,0
40	1273	252	0,10	0,44	18,0	1,32	35,6	0,3	92,8	40,0
	1473	252	0,08	0,33	18,1	1,46	29,1	0,3	91,7	40,0
	1673	252	0,06	0,19	18,2	1,73	15,4	0,2	90,7	40,0

В первую очередь оно отражается на величинах  $\varphi_{Ni}$  и  $\varphi_{Fe}$ . Например, содержание никеля в сплаве Fe–Ni повышается с 60 до 90 %.

Полученные данные позволяют судить о возможном селективном восстановлении никеля из оксидного расплава с сохранением основной массы железа в виде оксидов. Варьированием состава газовой смеси и температуры можно добиться требуемых значений  $\varphi_{Ni}$  и  $\varphi_{Fe}$ , а также необходимого состава сплава (ферроникеля) по основным компонентам. Повышение окислительного потенциала газовой фазы требует не только большего количества вводимой газовой смеси, но и ограничивает полноту протекания процесса. Стремление к полноте завершения процесса не оправдано при использовании смеси газов с низким восстановительным потенциалом. Такие действия ведут к образованию большого количества газов с повышенным содержанием CO и H<sub>2</sub>. Их использование возможно в качестве

вторичных энергоресурсов для выработки электроэнергии или обогрева вращающихся обжиговых печей, но сложно в исполнении в связи с необходимостью перемещения больших объемов горючих и экологически опасных потоков.

## Выводы

Методами термодинамического моделирования проведена оценка параметров восстановления никеля и железа из расплавов B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–NiO газовыми смесями CO–CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. Поэтапные изменения в составе расплавов связаны с последовательным восстановлением железа до двухвалентного состояния, и, затем, никеля до металла. Полученные данные полезны для создания технологий селективного восстановления металлов и формирования ферроникеля требуемого состава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Явойский А.В., Харлашин П.С., Чаудри Т.М. Научные основы современных сталеплавильных процессов. Мариуполь: ПГТУ, 2003. 276 с.
2. Морозов А.П., Агапитов Е.Б. Интенсификация комплексной обработки стали при циркуляционном вакуумировании с плазменным нагревом. Магнитогорск: МГТУ, 2003. 139 с.
3. Romenets V.A. Romelt Process // *I&SM (Iron & Steelmaker)*. 1995. Vol. 22. No. 1. P. 37–41.
4. Дорощев Г.А., Янговский П.Р., Смирнов К.Г., Степанов Я.М. Процесс ORIEN для выплавки высококачественных сталей из рудного и энергетического сырья на принципе самоэнергообеспечения // *Черные металлы*. 2017. № 5. С. 17–23.
5. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич и др. М.: *Металлургия*, 1986. 259 с.
6. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Copper*. 5th Edition. Elsevier, 2011. 481 p.
7. Vignes A. *Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes*. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 352 p.
8. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S., Alvear G.R.F. ISACONVERTTM – continuous converting of nickel/PGM mattes // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2011. Vol. 111. No. 10. P. 285–294.
9. Hughes S., Reuter M.A., Baxter R., Kaye A. AUMELT technology for lead and zinc processing // *Proceedings of Lead and Zinc 2008, 25-29 February 2008, South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), South Africa*. P. 147–162.
10. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш. и др. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова // *Цветные металлы*. 2010. № 10. С. 15–21.
11. Русаков М.Р. Обоedнение шлаковых расплавов продувкой восстановительными газами // *Цветные металлы*. 1985. № 3. С. 40–42.
12. Комков А.А., Баранова Н.В., Быстров В.П. Исследование восстановительного обоedнения высокоокисленных шлаков в условиях барботажа // *Цветные металлы*. 1994. № 12. С. 26–30.
13. Фомичев В.Б., Князев М.В., Рюмин А.А. и др. Исследование процесса обоedнения шлаков продувкой их газовыми смесями с различным парциальным давлением кислорода // *Цветные металлы*. 2002. № 9. С. 32–36.
14. Комков А.А., Камкин Р.Н. О механизме восстановления оксидов при продувке медеплавильных шлаков газовыми смесями
1. Yavoiskii A.V., Kharlashin P.S., Chaudri T.M. *Scientific Foundations of Modern Steelmaking Processes*. Mariupol: PSTU, 2003, 276 p. (In Russ.).
2. Morozov A.P., Agapitov E.B. *Intensification of Complex Steel Processing during Plasma-Heated Circulation Vacuuming*. Magnitogorsk: MSTU, 2003, 139 p. (In Russ.).
3. Romenets V.A. Romelt Process. *I&SM (Iron & Steelmaker)*. 1995, vol. 22, no. 1, pp. 37–41.
4. Dorofeev G.A., Yantovsky P.R., Smirnov K.G., Stepanov Ya.M. The process “ORIEN” for smelting of high-quality steels from ore and energy raw materials based on the principle of the energy self-supplying. *Chernye metalli*. 2017, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.).
5. Vanyukov A.B., Bystrov V.P., Vaskevich A.D., etc. *Melting in a Liquid Bath*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 259 p. (In Russ.).
6. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Copper*. 5th Edition. Elsevier, 2011, 481 p.
7. Vignes A. *Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes*. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc., 2011, 352 p.
8. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S., Alvear G.R.F. ISACONVERTTM – continuous converting of nickel/PGM mattes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2011, vol. 111, no. 10, pp. 285–294.
9. Hughes S., Reuter M.A., Baxter R., Kaye A. AUSMELT technology for lead and zinc processing. *Proceedings of Lead and Zinc 2008, 25-29 February 2008, South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), South Africa*, pp. 147–162.
10. Tsybulov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., etc. Analysis of various variants of the technological scheme for processing oxidized nickel ores into ferronickel using a two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metalli*. 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
11. Rusakov M.R. Depletion of slag melts by purging with reducing gases. *Tsvetnye metalli*. 1985, no. 3, pp. 40–42. (In Russ.).
12. Komkov A.A., Baranova N.V., Bystrov V.P. Research of reducing depletion of highly oxidized slags under bubbling conditions. *Tsvetnye metalli*. 1994, no. 12, pp. 26–30. (In Russ.).
13. Fomichev V.B., Knyazev M.V., Ryumin A.A., etc. Slags depletion by purging with gas mixtures at different partial oxygen pressure. *Tsvetnye metalli*. 2002, no. 9, pp. 32–36. (In Russ.).
14. Komkov A.A., Kamkin R.N. Mechanism of oxide reduction during copper-smelting slag purging with CO – CO<sub>2</sub> gas mixtures. *Izvestiya*

- CO – CO<sub>2</sub> // Известия вузов. Цветная металлургия. 2019. № 6. С. 13–22.
15. Вусихис А.С., Ченцов В.П., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 1. Теоретические основы процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. № 9. С. 639–644. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-639-643>
  16. Вусихис А.С., Дмитриев А.Н., Леонтьев Л.И., Шаврин С.В. Кинетика восстановления оксидов металлов из расплава газом-восстановителем в барботируемом слое // Материаловедение. 2002. № 10. С. 30–34.
  17. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer // The 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel. 2004. P. 1\_72–77.
  18. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer // Proceedings – European Metallurgical Conference EMC 2005, Dresden, Germany, 2005. Vol. 3. P. 1349–1358.
  19. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
  20. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ, 2013. 96 с.
  21. Pickles C. A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore // Minerals Engineering. 2013. Vol. 54. P. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
  22. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Chapter 2.4. Oxford: Elsevier Ltd. 2014. P. 701–838.
  23. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016. No. 4. P. 320–346.
  - vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. 2019, no. 6, pp. 13–22. (In Russ.).
  15. Vusikhis A.S., Chentsov V.P., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Metallic phase forming in barbotage of multicomponent oxide melt by reduction gas. Report 1. Theoretical basis of the process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 9, pp. 639–644. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-639-643>
  16. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Leont'ev L.I., Shavrin S.V. Kinetics of metal oxides reduction from the melt by reducing gas in the bubbled layer. *Materialovedenie*. 2002, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
  17. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer. *The 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel*. 2004, pp. 1\_72–77.
  18. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer. *Proceedings – European Metallurgical Conference EMC 2005, Dresden, Germany*. 2005, vol. 3, pp. 1349–1358.
  19. Vatin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling in High-Temperature Inorganic Systems*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
  20. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems*. Moscow: MSTU, 2013, 96 p. (In Russ.).
  21. Pickles C. A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 54, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
  22. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Chapter 2.4*. Oxford: Elsevier Ltd., 2014, pp. 701–838.
  23. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2016, no. 4, pp. 320–346.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Семенович Вусихис**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

**Леопольд Игоревич Леонтьев**, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-4343-914X

**Евгений Николаевич Селиванов**, д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

**Aleksandr S. Vusikhis**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

**Leopol'd I. Leont'ev**, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS", Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-4343-914X

**Evgenii N. Selivanov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

Поступила в редакцию 03.06.2020

После доработки 06.08.2020

Принята к публикации 16.04.2021

Received 03.06.2020

Revised 06.08.2020

Accepted 16.04.2021