



Оригинальная статья

УДК 669.04

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-240-245

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2294>



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ НАДСЛОЕВОГО ПРОСТРАНСТВА ПЕЧИ РОМЕЛТ

Г. С. Сборщиков, А. Л. Петелин, А. Ю. Терехова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Процесс Ромелт с точки зрения металлургической теплотехники является перспективным для переработки отходов производства, бедных руд и вторичных металлов без их предварительной подготовки и применения кокса. Но одним из основных недостатков процесса является высокий удельный расход кислорода и топлива на производство 1 т первичного металла. Особенность процесса Ромелт заключается в том, что основное количество теплоты, необходимой для осуществления технологического процесса, подается в барботажный слой из надслоевого пространства за счет дожигания отходящих газов техническим кислородом. Передача теплоты осуществляется по радиационно-конвективному механизму. Любые изменения процесса дожигания возможны, если они не влекут за собой недопустимого изменения температуры в зоне горения. В работе проведено исследование снижения удельного расхода кислорода на 1 т первичного металла, за основу приняты данные плавки на передельный чугун смеси шламов доменного и конвертерного производств. В работе изучена возможность снижения удельного расхода кислорода, подаваемого в надслоевое пространство печи для дожигания отходящих из барботажного слоя газов, в процессе Ромелт. При использовании подогрева дутья, подаваемого на нижние фурмы, и подогрева кислорода, подаваемого в зону дожигания, возможно сокращение удельного расхода кислорода на 1 т чугуна на 11 % без снижения производительности печи. В зоне дожигания рекомендуется использовать подогретый в рекуператоре до 400 °С кислород с одновременной подачей на нижние фурмы подогретого до 600 °С дутья.

Ключевые слова: процесс Ромелт, техногенные отходы, переработка отходов, использование технического кислорода

Для цитирования: Сборщиков Г.С., Петелин А.Л., Терехова А.Ю. Исследование тепловой работы надслоевого пространства печи Ромелт // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 240–245. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-240-245>

Original article

THERMAL OPERATION OF SUPERLAYER SPACE IN ROMELT FURNACE

G. S. Sborshchikov, A. L. Petelin, A. Yu. Terekhova

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. From the point of metallurgical heat engineering, the Romelt process is promising for processing industrial waste, poor ores and secondary metals without their preliminary preparation and the use of coke. But one of the main disadvantages of this process is high specific consumption of oxygen and fuel for the production of 1 ton of primary metal. The peculiarity of the Romelt process is that the main amount of heat required for implementation of the technological process is supplied to the bubbling layer from the superlayer space due to afterburning of the exhaust gases with technical oxygen. Heat transfer is carried out by a radiation-convective mechanism. Any changes in the afterburning process are possible, if they do not entail an unacceptable change in temperature in combustion zone. In the work, a study was conducted to reduce the specific oxygen consumption per 1 ton of primary metal, based on the data of melting a mixture of blast furnace and converter slurries for pig iron. The authors studied the possibility of reducing the specific oxygen consumption supplied to the superlayer space of the furnace for afterburning gases leaving the bubbling layer during the Romelt process. When using blast heating supplied to the lower tuyeres and oxygen heating supplied to the afterburning zone, it is possible to reduce the specific oxygen consumption per 1 ton of cast iron by 11 % without reducing the furnace performance. In the afterburning zone, it is recommended to use oxygen heated up to 400 °C in the recuperator with simultaneous supply of a blast heated up to 600 °C to the lower tuyeres.

Keywords: Romelt process, man-made waste, waste recycling, technical oxygen

For citation: Sborshchikov G.S., Petelin A.L., Terekhova A. Yu. Thermal operation of superlayer space in Romelt furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 240–245. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-240-245>

ВВЕДЕНИЕ

Печи и процесс Ромелт с точки зрения металлургической теплотехники являются весьма перспективными

для переработки металлургических и других отходов, бедных руд, вторичных металлов без их предварительной подготовки и применения кокса [1 – 7]. Недостатками процесса являются высокие удельные расходы

кислорода и топлива на производство 1 т первичного металла [8].

В работе [9] рассмотрен вопрос о возможности сокращения расхода кислорода, подаваемого в барботажный слой, в настоящей работе – возможность сокращения расхода кислорода, подаваемого в надслоевое пространство печи для дожигания отходящих из барботажного слоя газов. Особенность процесса Ромелт заключается в том, что основное количество теплоты, необходимой для осуществления технологического процесса (почти 85 %), подается в барботажный слой из надслоевого пространства за счет дожигания отходящих газов техническим кислородом. Передача теплоты осуществляется по радиационно-конвективному механизму и жестко привязана к температуре в зоне дожигания. Любые изменения процесса дожигания возможны только в том случае, если они не влекут за собой недопустимого изменения температуры в зоне горения.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности снижения удельного расхода кислорода на 1 т первичного металла (за основу приняты данные плавки на передельный чугун смеси шламов доменного и конвертерного производств на опытно-промышленной печи Ромелт Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) [10, 11]).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для расчета в работе приняты следующие параметры: производительность печи – 35 т/ч чугуна; расход кислородно-воздушной смеси на нижние фурмы со степенью обогащения дутья 60 % – 15 000 м³/ч; расход технического кислорода на нижние фурмы – 5850 м³/ч; расход технического кислорода в зону дожигания надслоевого пространства – 21 003 м³/ч. Состав уходящих из ванны газов: 64,6 % CO; 27,7 % H₂; 7,7 % N₂. Состав уходящих из печи газов после дожигания: 33,6 % CO; 3,5 % H₂; 37,4 % CO₂; 16,4 % H₂O; 9,1 % N₂ [11].

В качестве характеристики процесса в зоне дожигания приняли теоретическую температуру горения T_T , которая развивалась бы в зоне дожигания при полном использовании кислорода дутья и заданном уровне химического недожога при условии, что процесс горения протекает адиабатно. Эту величину (температурную характеристику процесса горения) можно определить только аналитически.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе изучали четыре варианта дожигания отходящих газов: холодным техническим кислородом (базовый вариант, реализованный на установке Ромелт НЛМК) [10]; подогретым воздухом; дутьем, содержащим 60 % кислорода; подогретым кислородом, подаваемым в зону дожигания и на нижние фурмы, и воздухом, подаваемым на нижние фурмы.

Рассмотрено уравнение теплового баланса горения 1 м³ отходящих газов (в работе использованы следующие обозначения: о.г. – газы, отходящие из барботажного слоя в надслоевое пространство печи; у.г. – газы, уходящие из надслоевого пространства в газоход):

$$Q_{y.g.}^{\phi} = V_{y.g.} c_{y.g.} T_T = Q_{o.g.}^x + i_{o.g.} + Q_d^{\phi} - Q_{y.g.}^x, \quad (1)$$

где $Q_{y.g.}^{\phi}$ – физически связанная теплота газов, покидающих зону дожигания, кДж/м³ газов, отходящих из барботажного слоя в надслоевое пространство печи; $V_{y.g.}$ – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м³ отходящих газов с заданным значением коэффициента расхода воздуха, м³; $c_{y.g.} = \sum_i c_i x_i$ – объемная теплоемкость уходящих газов, кДж/(м³·°C); c_i – объемная теплоемкость i -го компонента, кДж/(м³·°C); x_i – концентрация i -го компонента, доля единицы; T_T – теоретическая температура в зоне дожигания, °C; $Q_{y.g.}^x = 0,01(COg_{CO} + H_2g_{H_2})V_{y.g.}$ – химически связанная теплота газов, образовавшихся при сжигании 1 м³ отходящих газов, покидающих зону дожигания, кДж/м³ газов, отходящих из барботажного слоя в надслоевое пространство печи; g_{CO} и g_{H_2} – тепловой эффект реакции окисления указанных компонентов, кДж/м³; $Q_{o.g.}^x = 0,01(COg_{CO} + H_2g_{H_2})$ – теплота сгорания газов, поступающих в зону дожигания, кДж/м³; $i_{o.g.} = \sum_i i_i x_i$ – энтальпия газов, поступающих в зону дожигания, кДж/м³; x_i – концентрация i -го компонента в отходящих газах; Q_d^{ϕ} – теплота, вносимая в зону дожигания дутьем, подаваемым для сжигания 1 м³ отходящего газа, кДж/м³; CO, H₂ – содержание; n – коэффициент расхода дутья [12, 13].

Для каждого варианта решалась система из пяти уравнений, представляющая материальный баланс химических элементов (С, Н, О, N) и константы равновесия реакции водяного пара $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$:

$$K_p = \frac{V_{CO_2} V_{H_2}}{V_{CO} V_{H_2O}} = f(T).$$

Для базового варианта [10] дожигания отходящих газов холодным техническим кислородом при концентрации β кислорода в дутье 0,995 получили: $V_d^0 = 0,464$ м³/м³; $V_{y.g.} = 1,001$ м³/м³; $n = 0,54$; $T_T = 3977$ °C;

$\alpha_{\text{дож}} = \frac{Q_{o.g.}^x - Q_{y.g.}^x}{Q_{o.g.}^x} = 0,52$ – степень дожигания отходя-

щих газов; удельный расход технического кислорода 600 м³/т чугуна или 0,28 м³/м³ отходящих газов.

Во втором варианте изучили возможность полной замены кислорода в зоне дожигания подогретым воздухом. При подогреве воздуха в стальном рекуператоре до 600 °C и коэффициенте расхода дутья 0,54 теоретическая температура в зоне дожигания составляет 2885 °C.

Рассчитанное необходимое теплосодержание воздуха для обеспечения заданного значения T_T составляет

5058 кДж/м³. Для этого температура воздуха должна быть выше 3000 °С, что практически недостижимо. Таким образом, полная замена кислорода в зоне дожига на подогретый воздух при условии сохранения достигнутой удельной производительности печи невозможна.

В третьем варианте изучена возможность использования в зоне дожига дутья, подаваемого в барботажный слой через нижние фурмы. Как отмечено ранее, концентрация кислорода в дутье 60 %, исследования проведены для холодного и подогретого дутья. В обоих случаях стехиометрический расход дутья составил 0,769 м³/м³ отходящих газов. Коэффициент расхода дутья изменяли в пределах от 0,45 до 0,9. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и графически показаны на рис. 1.

Удельный расход кислорода уменьшается при снижении коэффициента расхода дутья [14 – 16]. При сопоставлении полученных результатов с базовым вариантом можно сделать вывод, что удельный расход кислорода минимален при использовании в зоне дожига не дутья, а технического кислорода. Поэтому для экономии кислорода при дожигании отходящих газов необходимо не понижать его концентрацию в дутье, а держать ее предельно высокой и, по возможности, по-

нижать коэффициент расхода дутья. Однако очевидно, что при $n < 1$ уменьшение коэффициента расхода дутья ведет к сокращению объема сжигаемого горючего и соответствующему сокращению количества теплоты, выделяющейся в зоне горения, что влечет за собой

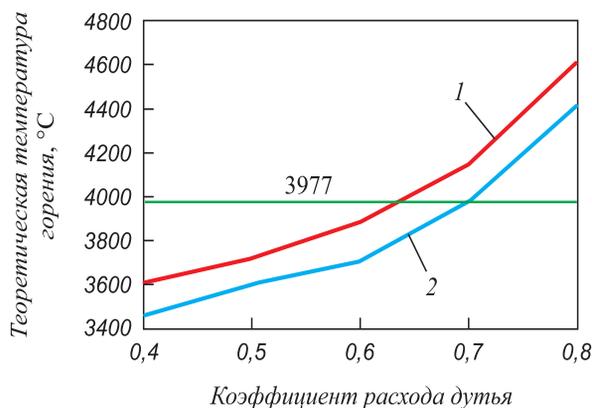


Рис. 1. Зависимость теоретической температуры горения от коэффициента расхода дутья с содержанием кислорода 60 %: 1 – подогретое дутье; 2 – холодное дутье

Fig. 1. Dependence of theoretical combustion temperature on the consumption coefficient of the blast with oxygen content of 60 %: 1 – heated blast; 2 – cold blast

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета процесса дожигания отходящих газов при подаче в зону дожигания дутья, обогащенного кислородом ($\beta = 0,6$)

Table 1. Results of calculating the process of exhaust gases afterburning when an oxygen-enriched blast is supplied to the afterburning zone ($\beta = 0,6$)

Показатель	Значение при n				
	0,45	0,54	0,60	0,70	0,90
$V_{y.g.}, \text{ м}^3/\text{м}^3$	1,0680	1,1660	1,1846	1,2150	1,2770
в том числе					
H_2O	0,2313	0,2466	0,2539	0,2628	0,2744
CO_2	0,1840	0,2518	0,2999	0,3833	0,5563
CO	0,4620	0,3940	0,3460	0,2627	0,0897
H_2	0,0457	0,0304	0,0230	0,0142	0,0260
N_2	0,1461	0,2430	0,2616	0,2924	0,3539
$V_d, \text{ м}^3/\text{м}^3$	0,346	0,415	0,461	0,538	0,692
$Q_{o.g.}^x, \text{ кДж}/\text{м}^3$	6446	5300	4602	3467	1158
$\alpha_{\text{дож}}, \%$	43,3	52,5	58,8	68,9	89,6
$c_{y.g.}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$	2,05	2,29	2,38	2,52	2,82
$Q_{y.g.}, \text{ кДж}/\text{м}^3$					
с подогревом дутья	7465	8544	9280	10 492	12 941
без подогрева дутья	7148	8163	8857	9999	12 306
$T_T, \text{ °C}$					
с подогревом	3607	3717	3887	4147	4607
без подогрева	3462	3597	3707	3977	4412

недопустимое понижение температуры [17 – 21]. Для компенсации указанных потерь теплоты при понижении коэффициента расхода дутья можно использовать подогрев кислорода, подаваемого в зону дожигания, и дутья, обогащенного кислородом, подаваемого на нижние фурмы.

Для указанного варианта определен минимально допустимый коэффициент расхода дутья. Для подогрева кислорода использован стальной конвективный рекуператор, во избежание возникновения кислородной коррозии материала теплообменника подогрев кислорода ограничен 400 °С. Подогрев воздуха предполагается осуществлять до 600 °С в радиационном трубчатом стальном рекуператоре.

Результаты исследования представлены в табл. 2 и на рис. 2.

При подогреве дутья, подаваемого на нижние фурмы, количество вносимой в барботажный слой теплоты определяется по формуле

$$Q_{\text{д.н.ф.}}^{\Phi} = V_{\text{к}} c_{\text{к}} T_{\text{к}} + V_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}}$$

и составляет $0,35 \cdot 10^6$ кДж/т чугуна.

Это позволит без снижения температуры в ванне уменьшить коэффициент расхода дутья в зоне дожигания

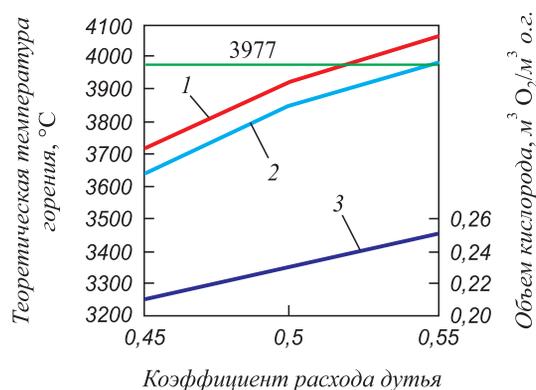


Рис. 2. Зависимость теоретической температуры горения и удельного расхода кислорода (3) от коэффициента расхода дутья при подаче в зону дожигания технического кислорода ($\beta_{\text{к}} = 0,995$): 1 – подогретое дутье; 2 – холодное дутье

Fig. 2. Dependence of theoretical combustion temperature and specific oxygen consumption (3) on the coefficient of blast consumption when supplying technical oxygen to the afterburning zone ($\beta_{\text{к}} = 0,995$): 1 – heated blast; 2 – cold blast

ния до значения $n = 0,48$ (против 0,54 в базовом режиме). При этом степень дожигания отходящих газов составит 46,1 % (52 % в базовом режиме), теоретическая температура в зоне дожигания 3867 °С. Реализация

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета процесса дожигания отходящих газов при подаче в зону дожигания технического кислорода и изменении коэффициента расхода дутья

Table 2. Results of calculating the process of exhaust gases afterburning when supplying technical oxygen to the afterburning zone and changing the coefficient of blast consumption

Показатель	Значение при n		
	0,45	0,50	0,54
$V_{\text{у.г.}}$, м³/м³	1,0010435	1,0011595	1,0012522
в том числе			
H ₂ O	0,184	0,221	0,252
CO ₂	0,2313	0,2410	0,2470
CO	0,0457	0,0364	0,3040
H ₂	0,4620	0,4250	0,3940
N ₂	0,0780	0,0782	0,0783
$Q_{\text{у.г.}}^x$, кДж/м³	6320	5755	5300
$c_{\text{у.г.}}$, кДж/(м³·°C)	1,94	1,97	2,00
$V_{\text{к}}$, м³/м³	0,21	0,23	0,25
$Q_{\text{у.г.}}$, кДж/м³			
на холодном кислороде	7173	7737	8155
на подогретом кислороде	7286	7865	8327
$T_{\text{г}}$, °C			
на холодном кислороде	3642	3847	3977
на подогретом кислороде	3717	3922	4057
$\alpha_{\text{дож}}$, %	43,2	48,3	52,3

рекомендуемого режима позволит на базовом образце сократить расход кислорода в зоне дожига на 11 %.

Выводы

Замена кислорода в зоне дожига подогретым воздухом без уменьшения производительности печи не представляется возможной.

При использовании в зоне дожига вместо кислорода дутья, обогащенного кислородом, возможно обеспечить заданную температуру в зоне горения как с подогревом дутья, так и без подогрева. Однако во всех случаях удельный расход кислорода при этом не уменьшается, а увеличивается по сравнению с этой величиной в базовом варианте. Сократить удельный расход кисло-

рода в зоне дожига возможно за счет использования одновременного подогрева кислорода, подаваемого в зону дожига, и дутья, обогащенного кислородом, который подается через нижние фурмы в барботажный слой. Реализация предельно допустимых уровней подогрева кислорода и воздуха в стальных теплообменниках позволит сократить удельный расход кислорода по сравнению с базовым режимом на 2357 м³/ч, что эквивалентно снижению потребляемой электрической мощности на 1415 кВт или 10 188 МВт·ч/год.

Для достижения поставленной задачи рекомендуется в зоне дожига использовать подогретый в рекуператоре до 400 °С кислород ($\beta = 0,995$) при $n = 0,48$ с одновременной подачей на нижние фурмы подогретого дутья ($\beta = 0,6$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Роменец В.А., Галкин В.И., Федорова А.А., Валавин В.С., Покхвиснев Ю.В., Макеев С.А. Сравнительная технико-экономическая оценка бескоковых технологий производства первичного железа для мини-заводов // Экономика в промышленности. 2013. № 3. С. 38–44.
2. Anameric B., Kawatra S.K. Direct iron smelting reduction processes // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2008. Vol. 30. No. 1. P. 1–51. <https://doi.org/10.1080/08827500802043490>
3. Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V., Vandar'ev S.V., Chumarin B.A., Malyutin A.N. Calculation of the material and heat balances of the Romelt liquid-phase reduction process // *Steel in Translation*. 1996. Vol. 26. No. 7. P. 75–80.
4. Абраменков Ю.Я., Стригунов Н.А. Сравнение технико-экономических и технологических характеристик процессов жидкофазного восстановления железа. В кн.: *Металлургическая теплотехника: сб. научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. Днепропетровск: Новая идеология, 2008. С. 3–19.
5. Куронов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездомной металлургии железа. М.: Черметинформация, 2002. 198 с.
6. Терехова А.Ю. Процессы внедомного производства чугуна. Состояние вопроса. В кн.: *Сб. IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология»*. М.: 2018. С. 79–88.
7. Petelin A.L., Polulyakh L.A., Makeev D.B., Dashevskii V.Ya. Thermodynamic justification of the dephosphorization of manganese ores and concentrates in a reducing atmosphere // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. Vol. 2018. No. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1134/S003602951801010X>
8. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. М.: КИЦ «Академкнига», 2007. 464 с.
9. Sborshchikov G.S., Petelin A.L., Terekhova A.Yu. Increasing the specific performance of Romelt furnace // *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. No. 3-4. P. 208–213. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00985-y>
10. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2005. 400 с.
11. Зайцев А.К., Криволапов Н.В., Валавин В.С. Термодинамическое моделирование поведения кремния и марганца в процессе Ромелт // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002. Т. 45. № 11. С. 3–7.
12. Семененко Н.А. Организация теплоиспользования и энерготехнологического комбинирования в промышленной огнетехнике. М.: Энергия, 1976. 280 с.
1. Romenets V.A., Galkin V.I., Fedorova A.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V., Makeev S.A. Comparative feasibility study of coke-free technologies for the production of primary iron for mini-mills. *Ekonomika v promyshlennosti*. 2013, no. 3, pp. 38–44. (In Russ.).
2. Anameric B., Kawatra S.K. Direct iron smelting reduction processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2008, vol. 30, no. 1, pp. 1–51. <https://doi.org/10.1080/08827500802043490>
3. Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V., Vandar'ev S.V., Chumarin B.A., Malyutin A.N. Calculation of the material and heat balances of the Romelt liquid-phase reduction process. *Steel in Translation*. 1996, vol. 26, no. 7, pp. 75–80.
4. Abramnikov Yu.Ya., Strigunov N.A. Comparison of technical, economic and technological characteristics of iron liquid-phase reduction. In: *Metallurgical Heat Engineering: Transactions of the National Metallurgical Academy of Ukraine*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya, 2008, pp. 3–19. (In Russ.).
5. Kurunov I.F., Savchuk N.A. *State and Prospects of Iron Metallurgy without Blast Furnace*. Moscow: Chermetinformatiya, 2002, 198 p. (In Russ.).
6. Terekhova A.Yu. Processes of cast iron production without blast furnace. State of the issue. In: *Transactions of the 9th Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies in Industry. Furnace Units. Ecology"*. Moscow: 2018, pp. 79–88. (In Russ.).
7. Petelin A.L., Polulyakh L.A., Makeev D.B., Dashevskii V.Ya. Thermodynamic justification of the dephosphorization of manganese ores and concentrates in a reducing atmosphere. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1134/S003602951801010X>
8. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgy of Iron*. Moscow: Akademkniga, 2007, 464 p. (In Russ.).
9. Sborshchikov G.S., Petelin A.L., Terekhova A.Yu. Increasing the specific performance of Romelt furnace. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 3-4, pp. 208–213. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00985-y>
10. *ROMELT Process*. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
11. Zaitsev A.K., Krivolapov N.V., Valavin V.S. Thermodynamic modeling of silicon and manganese behavior in Romelt process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, vol. 45, no. 11, pp. 3–7. (In Russ.).
12. Semenenko N.A. *Organization of Heat Use and Energy Technology Combination in Industrial Fire Engineering*. Moscow: Energiya, 1976, 280 p.

13. Евдокименко А.И., Костерин В.В. Природный газ в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1972. 240 с.
14. Pokhvisnev Yu.V., Valavin V.S., Makeev S.A., Zaitsev A.K. Romelt process production indices with partial replacement of coal by natural gas // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 1-2. P. 141–148. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00803-0>
15. Сборщиков Г.С., Вельтишев Н.Ф., Володин А.М., Крупеников С.А. Модель свободной конвекции в ванне аппарата с барботажным слоем при ее продувке газом через фурмы, расположенные сбоку // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2013. Т. 56. № 11. С. 25–27.
16. Николаенко Н.К. Усовершенствование конструкции и режима работы печей с барботажным слоем с учетом процессов образования брызг и их сепарации в надслоевом пространстве. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.16.08 Металлургическая теплотехника. М.: МИСиС, 1986. 18 с.
17. Теплотехника металлургического производства. Т. 1. Теоретические основы / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. М.: МИСиС, 2002. 608 с.
18. Sborshchikov G.S., Krupennikov S.A. Universal energy-efficient refining furnace // *Metallurgist*. 2009. Vol. 53. No. 5-6. P. 329–335. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9182-8>
19. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1990, 352 с.
20. Vil'danov S.K., Valavin V.S., Romanets V.A. Prospects for using Romelt technology to reprocess red muds // *Steel in Translation*. 1998. Vol. 28. No. 7. P. 13–19.
21. Romanets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V. Technological assessment of the Romelt process in the classic and two-zone variants // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 1-2. P. 20–27. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9862-x>
13. Evdokimenko A.I., Kosterin V.V. *Natural Gas in Non-Ferrous Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 240 p. (In Russ.).
14. Pokhvisnev Yu.V., Valavin V.S., Makeev S.A., Zaitsev A.K. Romelt process production indices with partial replacement of coal by natural gas. *Metallurgist*. 2019, vol. 63, no. 1-2, pp. 141–148. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00803-0>
15. Sborshchikov G.S., Vel'tishchev N.F., Volodin A.M., Krupennikov S.A. Model of free convection in the bath unit with a bubbling layer with her blowing gas via the side tuyeres. *Izvestiya.Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 11, pp. 25–27. (In Russ.).
16. Nikolaenko N.K. *Improvement of the design and operating mode of furnaces with a bubbling layer, taking into account the processes of spray formation and their separation in the above-layer space: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Moscow: MISiS, 1986, 18 p. (In Russ.).
17. Krivandin V.A., Arutyunov V.A., Belousov V.V., etc. *Heat Engineering of Metallurgical Production. Vol. 1. Theoretical Foundations*. Moscow: MISiS, 2002, 608 p. (In Russ.).
18. Sborshchikov G.S., Krupennikov S.A. Universal energy-efficient refining furnace. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 5-6, pp. 329–335. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9182-8>
19. Khzmalyan D.M. *Theory of Furnace Processes*. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 352 p. (In Russ.).
20. Vil'danov S.K., Valavin V.S., Romanets V.A. Prospects for using Romelt technology to reprocess red muds. *Steel in Translation*. 1998, vol. 28, no. 7, pp. 13–19.
21. Romanets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V. Technological assessment of the Romelt process in the classic and two-zone variants. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 1-2, pp. 20–27. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9862-x>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глеб Семенович Сборщиков, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: g.sborshchikov@mail.ru

Александр Львович Петелин, д.ф.-м.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: alexander-petelin@yandex.ru

Анастасия Юрьевна Терехова, заведующая лабораторией кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-1286-5576

E-mail: terekhova.nastya@mail.ru

Gleb S. Sborshchikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: g.sborshchikov@mail.ru

Aleksandr L. Petelin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: alexander-petelin@yandex.ru

Anastasiya Yu. Terekhova, Head of the Laboratory of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-1286-5576

E-mail: terekhova.nastya@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 25.11.2021

Принята к публикации 10.01.2022

Received 25.06.2021

Revised 25.11.2021

Accepted 10.01.2022