

Оригинальная статья

УДК 669.184

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-3(57)-29-39

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
НАНЕСЕНИИ ШЛАКОВОГО ГАРНИСАЖА НА ФУТЕРОВКУ КОНВЕРТЕРА**

© 2026 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, С. А. Полежаев

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. На основе топологического метода сформирована математическая модель процесса ошлакования футеровки кислородного конвертера с применением специальной гарнисажной фурмы. Построена диаграмма связей системы фурма – газопорошковая смесь – шлак – футеровка конвертера, на основании которой получена аналитическая форма рассматриваемой модели в виде системы уравнений. Аналитические уравнения после их приведения к каноническому виду позволяют моделировать динамику основных параметров нанесения шлакового гарнисажа по ходу процесса. С использованием разработанной модели применительно к условиям промышленного большегрузного конвертера определены расчетные изменения давления и расхода газа по участкам подводящих трубопроводов и фурмы, а также скорости движения шлаковой эмульсии при реализации процесса ошлакования футеровки. Сравнительный анализ расчетных значений параметров процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера с измеренными фактическими значениями параметров работы промышленного конвертерного агрегата подтвердил адекватность разработанной модели. По результатам моделирования определены закономерности изменения давления и расхода азота, скорости движения шлака по ходу процесса ошлакования футеровки, которые свидетельствуют о наличии режима работы с периодом пульсаций порядка 3 с и присутствием периодического изменения амплитуд. Полученные результаты численного моделирования являются теоретической базой для совершенствования технологических режимов газопорошковой раздувки шлака на стенки конвертера с целью повышения показателей качества формируемого гарнисажного покрытия, снижения энергетических и материальных затрат.

Ключевые слова: кислородный конвертер, футеровка, шлак, газопорошковая смесь, гарнисажная фурма, модель

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Полежаев С.А. Моделирование гидрогазодинамических процессов при нанесении шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;3(57):29–39. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-29-39](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-29-39)

Original article

**MODELING HYDROGAS-DYNAMIC PROCESSES DURING APPLICATION OF
SLAG COATING TO THE CONVERTER LINING**

© 2026 E. V. Protopopov, A. A. Umanskii, S. A. Polezhaev

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Based on the topological method, a mathematical model of the process of slagging the lining of an oxygen converter using a special mounting lance has been formed. A diagram of the relations of the lance system – gas-powder mixture – slag – converter lining is constructed, on the basis of which an analytical form of the model under consideration is obtained in the form of a system of equations. The analytical equations, after

their reduction to the canonical form, allow us to model the dynamics of the main parameters of the slag dressing application during the process. Using the developed model in relation to the conditions of an industrial heavy converter, calculated changes in gas pressure and flow rate along the sections of supply pipelines and tuyeres, as well as the speed of movement of the slag emulsion during the process of lining slagging, were determined. A comparative analysis of the calculated values of the parameters of the process of applying slag garnishing to the converter foot with the measured actual values of the operating parameters of the industrial converter unit confirmed the adequacy of the developed model. Based on the simulation results, patterns of changes in nitrogen pressure and flow rate, and the speed of slag movement during the lining slagging process have been determined, which indicate the presence of an operating mode with a pulsation period of about 3 seconds and the presence of periodic changes in amplitudes. The obtained results of numerical modeling are the theoretical basis for improving the technological modes of gas-powder slag blowing on the walls of the converter in order to improve the quality of the formed garnishing coating, reducing energy and material costs.

Keywords: oxygen converter, lining, slag, gas-powder mixture, skull tuyere, model

For citation: Protopopov E.V., Umanskii A.A., Polezhaev S.A. Modeling of hydrogasdynamic processes during the application of slag coating to the converter lining. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;3(57):29–39. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-29-39](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-29-39)

Введение

Повышение стойкости футеровки кислородных конвертеров является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед сталеплавленным производством, поскольку рассматриваемый параметр напрямую определяет продолжительность кампании, показатели межремонтного периода работы агрегатов, а, следовательно, влияет на затраты при выплавке стали [1; 2]. Существенное продление срока службы футеровки достигается применением новых огнеупорных материалов [3; 4], системным использованием по ходу кампании «горячих» ремонтов, в том числе подварки и торкретирование изношенных участков огнеупорного покрытия [5; 6]. Одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов увеличения срока службы футеровки кислородных конвертеров является технология нанесения шлакового гарнисажа [7; 8]. Применение рассматриваемого метода предполагает раздувку предварительно подготовленного шлака на стенки конвертера в период межплавочных простоев. Подготовка шлака, как правило, заключается в достижении оптимального содержания в нем оксида MgO , который с одной стороны обеспечивает формирование качественного гарнисажного покрытия [9 – 11], а с другой стороны не снижает рафинирующие свойства шлака в процессе выплавки стали [12 – 14].

Раздувка шлака на стенки конвертера с целью формирования гарнисажного защитного покрытия может проводиться как азотом с использованием стандартной кислородной фурмы, так и с применением специальной гарнисажной фурмы, установленной в резервном стенде машины подачи технологических газов, путем подачи га-

зопорошковой смеси. Применение гарнисажных фурм для ошлакования футеровки конвертеров имеет ряд преимуществ по отношению к использованию стандартных кислородных фурм, в частности, обеспечивается повышение качества и равномерности формирования защитного покрытия на футеровке [15 – 17]. Также немаловажным моментом, свидетельствующим в пользу применения специализированных гарнисажных фурм, является их универсальность, то есть возможность использования такого дутьевого устройства не только для раздувки шлака, но и для выполнения торкретирования футеровки при различном сочетании последовательности рассматриваемых операций.

Следует отметить, что процесс нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров, в особенности при использовании специальных фурм, является многофакторной технологической задачей. При его реализации одновременно протекают взаимосвязанные газогидродинамические, тепломассообменные, механические и химические процессы [18 – 20], что обуславливает возможность оптимизации технологических режимов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров при широком применении методов математического моделирования [21 – 23].

В настоящей работе проведено численное моделирование процесса ошлакования футеровки большегрузного кислородного конвертера с применением специальной гарнисажной фурмы.

Разработка модели процесса ошлакования футеровки с применением гарнисажных фурм

На предварительном этапе формирования модели нанесения шлакового гарнисажа на фу-

теровку кислородного конвертера с использованием специальной фурмы провели разбивку рассматриваемого процесса на блоки (рис. 1). В укрупненном виде схема включает в себя следующие этапы: в смесительное устройство по двум независимым потокам поступает порошковый магниальный материал в струе несущего газа и основной поток азота для разбрызгивания шлака; далее в смесительном устройстве происходит формирование объединенного газопорошкового потока, который через сопла Лаваля подается в рабочее пространство конвертера и, вступая во взаимодействие со шлаком, раздувает его на стенки конвертерного агрегата.

При формировании модели гидрогазодинамики применили топологический метод, в результате чего получены диаграммы связей для каждого из блоков общей схемы процесса (рис. 2). Известно, что топологический метод в моделировании позволяет сконцентрироваться на пространственных отношениях элементов модели, а не на их геометрических параметрах. На полученных диаграммах связи в качестве переменных выступают давление (P) и расход (Q) азота на соответствующих участках системы. Для учета явления диссипации потока в трубопроводе вводятся элементы R , для учета способности накапливать

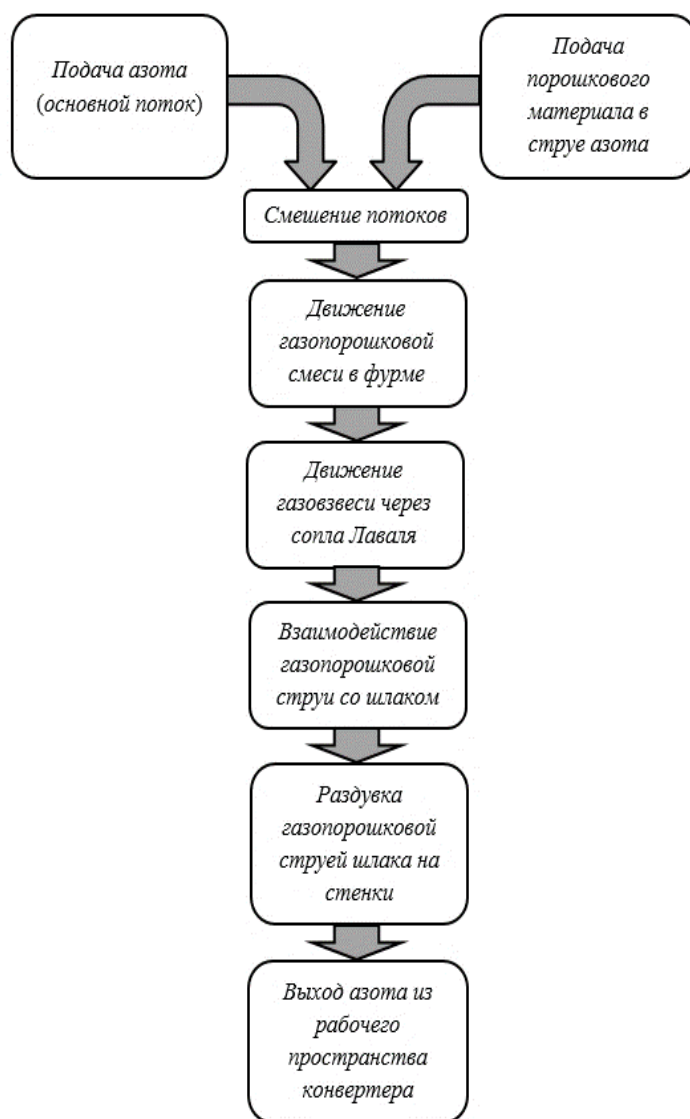


Рис. 1. Схема процесса ошлакования футеровки конвертера с использованием гарнисажной фурмы

Fig. 1. Scheme of the converter lining slagging process using a skull tuyere

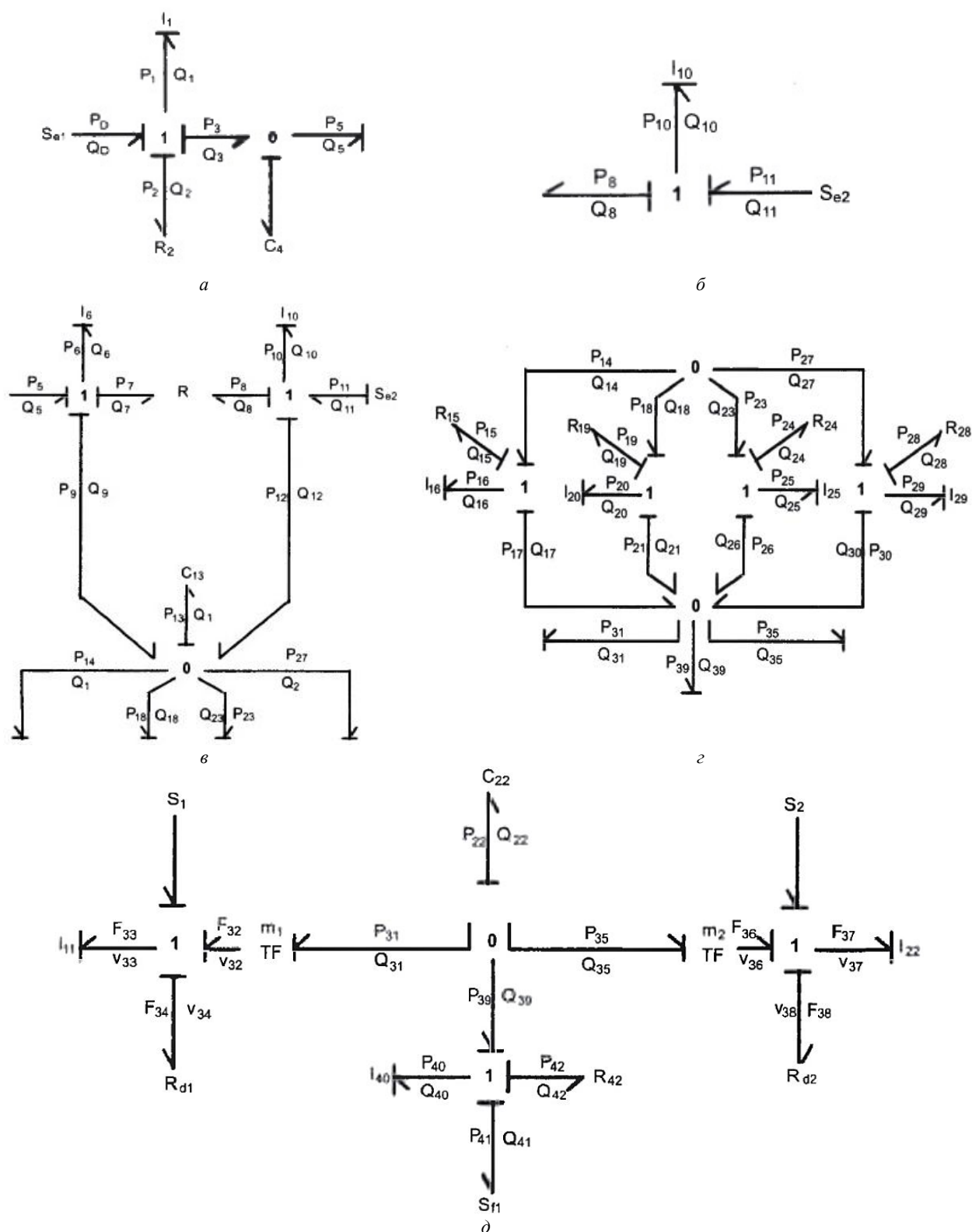


Рис. 2. Диаграммы связей процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера с использованием специальной фурмы по участкам:

a – трубопровод подачи азота в фурму; *б* – подача магнезиального материала в фурму; *в* – смешивательное устройство в верхней части фурмы; *з* – сопла Лавалья; *д* – перемещение шлаковой массы газопорошковой струей на стенки конвертера – выход азота из рабочего пространства конвертера

Fig. 2. Connection diagrams of the process of applying a slag skull to the lining of a converter using a special tuyere by sections:

a – pipeline for feeding nitrogen to the tuyere; *б* – feeding magnesite material to the tuyere; *в* – mixing device in the upper part of the tuyere; *з* – Laval nozzles; *д* – movement of the slag mass by a gas-powder jet onto the walls of the converter – nitrogen outlet from the working space of the converter

потенциальную энергию – элементы C . При этом указанные элементы рассчитываются по формулам, полученным на основании общепринятых положений теории термо- и гидрогазодинамики с учетом конструктивных особенностей узлов рассматриваемой системы:

$$R = \xi \frac{8L\rho Q}{\pi^2 D^5}, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент потери давления; L – длина участка трубопровода; ρ – плотность потока; Q – расхода газа; D – диаметр элемента продвучной системы.

$$C = \frac{V}{\rho R T}, \quad (2)$$

где V – объем участка; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Инерционные элементы систем I_n определяются по следующему выражению:

$$I = \frac{L\rho}{\pi D^2}, \quad (3)$$

Последовательное и параллельное соединения элементов систем отображено с использованием 1- и 0-структур; источники (стоки) усилия обозначены S_e , источники или стоки потока – S_f . Символами в виде полустрелок обозначены направления передачи мощности, штриховыми линиями – причинно-следственные связи элементов.

Путем обобщения диаграмм связей отдельных участков (рис. 2) сформирована единая диаграмма связей всей рассматриваемой системы (рис. 3), на основании которой получена аналитическая форма модели в виде системы уравнений:

$$I_1 \frac{dQ_1}{dt} = P_D - Q_2 R_2 - P_4; \quad (4)$$

$$C_4 \frac{dP_4}{dt} = Q_1 - Q_6; \quad (5)$$

$$I_6 \frac{dQ_6}{dt} = P_4 - Q_6 R_2 - P_{13}; \quad (6)$$

$$I_{10} \frac{dQ_{10}}{dt} = P_{11} - Q_{10} R - P_{13}; \quad (7)$$

$$C_{13} \frac{dP_{13}}{dt} = Q_6 + Q_{10} - Q_{16} + Q_{20} - Q_{25} - Q_{29}; \quad (8)$$

$$I_{16} \frac{dQ_{16}}{dt} = P_{13} - Q_{16} R_{15} - P_{22}; \quad (9)$$

$$I_{20} \frac{dQ_{20}}{dt} = P_{13} - Q_{20} R_{19} - P_{22}; \quad (10)$$

$$I_{25} \frac{dQ_{25}}{dt} = P_{13} - Q_{25} R_{24} - P_{22}; \quad (11)$$

$$I_{29} \frac{dQ_{29}}{dt} = P_{13} - Q_{29} R_{28} - P_{22}; \quad (12)$$

$$C_{22} \frac{dP_{22}}{dt} = Q_{25} + Q_{20} + Q_{16} + Q_{29} - Q_{40} - v_{33} m_1 - v_{37} m_2; \quad (13)$$

$$I_{11} \frac{dv_{33}}{dt} = P_{22} m_1 - M_{1g} - v_{33} R_{d1}; \quad (14)$$

$$I_{22} \frac{dv_{37}}{dt} = P_{22} m_2 - M_{2g} - v_{37} R_{d2}; \quad (15)$$

$$I_{40} \frac{dQ_{40}}{dt} = P_{22} - Q_{40} R_{42} - P_{41}. \quad (16)$$

После приведения к каноническому виду, с использованием формул (1) – (3) система уравнений приняла следующий вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{\left(P_D - \frac{8\xi_2 L_2 P_2 Q_1^2}{4\rho_2 D_2^5}\right) \pi D_2^2}{4\rho_2 L_2}; \quad (17)$$

$$\frac{dP_4}{dt} = \frac{4(Q_1 - Q_6) \rho_2 R_{N_2} T_{N_2} \delta}{\pi D_2^2 L_2}; \quad (18)$$

$$\frac{dQ_6}{dt} = \frac{\left\{P_4 - \left[\frac{\xi_7 \rho_7 - Q_6^2}{2(0,785 D_7^2)} + \frac{\rho_7 Q_6 Q_{10}}{0,785 D_7}\right] - P_1\right\} 4\rho_6 L_6}{4\rho_6 L_6}; \quad (19)$$

$$\frac{dQ_{10}}{dt} = \frac{\left\{P_{11} - \left[\frac{\rho_7 Q_6^2}{0,785 D_7} + \frac{\xi_8 \rho_8 Q_{10}^2}{2(0,785 D_8^2)}\right] - P_1\right\} 4\rho_{10} L_{10} (\pi D_2^2 - \pi D_{10}^2)}{4\rho_{10} L_{10} (\pi D_2^2 - \pi D_{10}^2)}; \quad (20)$$

$$\frac{dP_{13}}{dt} = \frac{4(Q_6 + Q_{10} - Q_{16} + Q_{20} - Q_{25})}{\pi D_2^2 L_{13} \rho_{13} R_{N_2} T_{N_2} \delta} - \frac{Q_{29} \rho_2 R_{N_2} T_{N_2} \delta}{\pi D_2^2 L_{13} \rho_{13} R_{N_2} T_{N_2} \delta}; \quad (21)$$

$$\frac{dQ_{16}}{dt} = \frac{\left(P_{13} - \frac{8\xi_{16} L_{16} \rho_{16} Q_{16}^2}{\pi^2 D_{16}^5} - P_{22}\right) \pi D_{16}^2}{4\rho_{16} L_{16}}; \quad (22)$$

$$\frac{dQ_{20}}{dt} = \frac{\left(P_{13} - \frac{8\xi_{20} L_{20} \rho_{20} Q_{20}^2}{\pi^2 D_{20}^5} - P_{22}\right) \pi D_{20}^2}{4\rho_{20} L_{20}}; \quad (23)$$

$$\frac{dQ_{25}}{dt} = \frac{\left(P_{13} - \frac{8\xi_{25} L_{25} \rho_{25} Q_{25}^2}{\pi^2 D_{25}^5} - P_{22}\right) \pi D_{25}^2}{4\rho_{25} L_{25}}; \quad (24)$$

$$\frac{dQ_{29}}{dt} = \frac{\left(P_{13} - \frac{8\xi_{29} L_{29} \rho_{29} Q_{29}^2}{\pi^2 D_{29}^5} - P_{22}\right) \pi D_{29}^2}{4\rho_{29} L_{29}}; \quad (25)$$

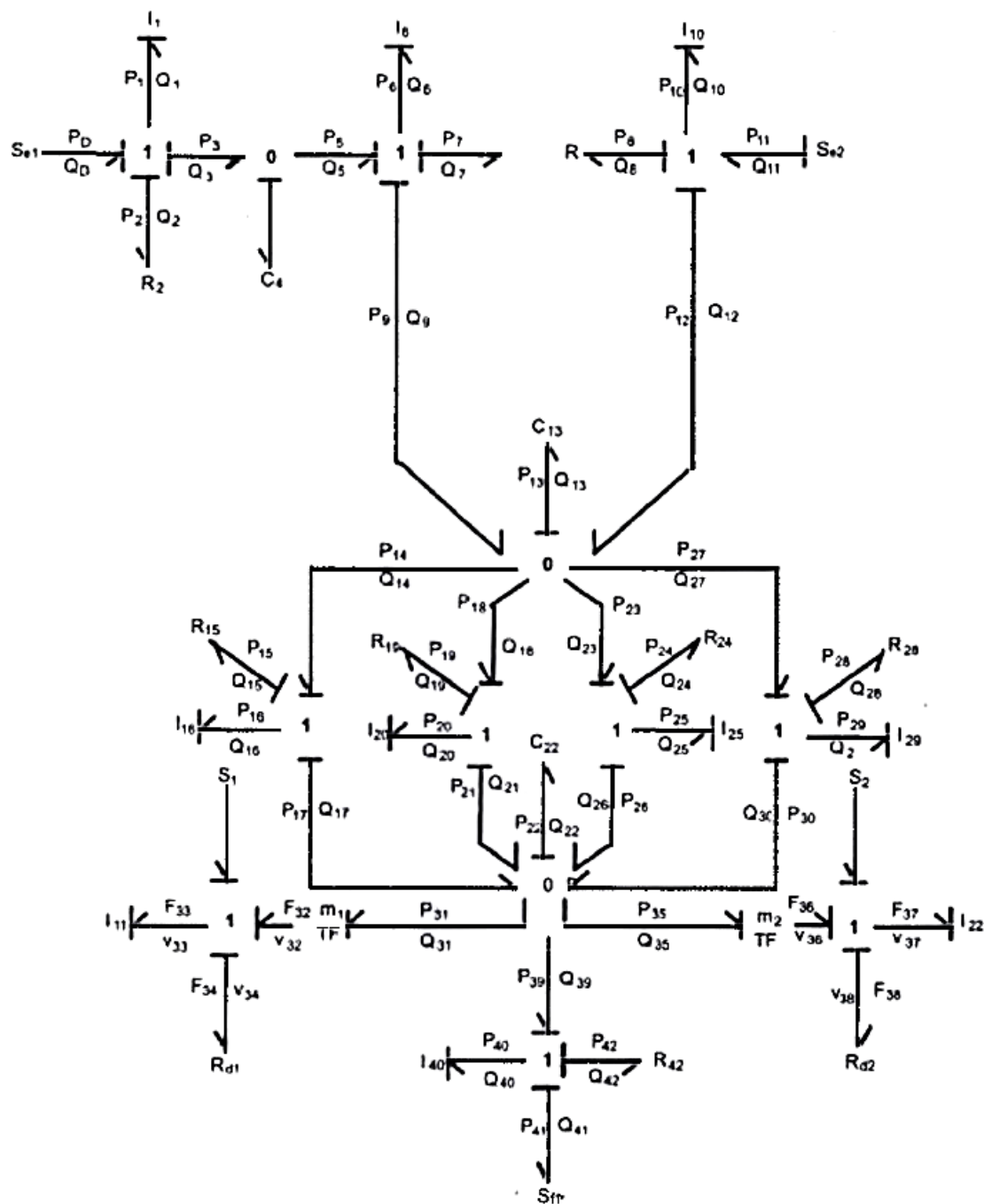


Рис. 3. Обобщенная диаграмма связей процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера с применением специальной фурмы

Fig. 3. Generalized diagram of the connections of the process of applying slag coating to the converter lining using a special tuyere

$$\frac{dP_{22}}{dt} = \frac{4(Q_{16} + Q_{20} + Q_{25} - Q_{40} - v_{33}m_1)}{V_{22}} - \frac{v_{37}m_2\rho_2R_{N_2}T_{N_2}\delta}{V_{22}} - \rho_{22}R_{N_2}T_{N_2}\delta; \quad (26)$$

$$\frac{dv_{33}}{dt} = \frac{P_{22}m_1 - M_1g - v_{33}R_{d1}}{I_{11}}; \quad (27)$$

$$\frac{dv_{37}}{dt} = \frac{P_{22}m_2 - M_2g - v_{37}R_{d2}}{I_{22}}; \quad (28)$$

$$\frac{dQ_{40}}{dt} = \frac{\left(P_{22} - \frac{8\xi_{40}L_{40}\rho_{20}Q_{40}^2}{\pi^2 D_{40}^5} - P_{22}\right)\pi D_{40}^2}{4\rho_{40}L_{40}}, \quad (29)$$

где Q_1 – расход азота на входе в продувочную фурму; P_D – давление азота на входе в продувочную фурму; $\xi_2, \xi_8, \xi_{16} - \xi_{29}$ – коэффициенты гидравлических сопротивлений трактов; ξ_{40} – коэффициент гидравлического сопротивления участка горловины конвертера; L_2 – длина

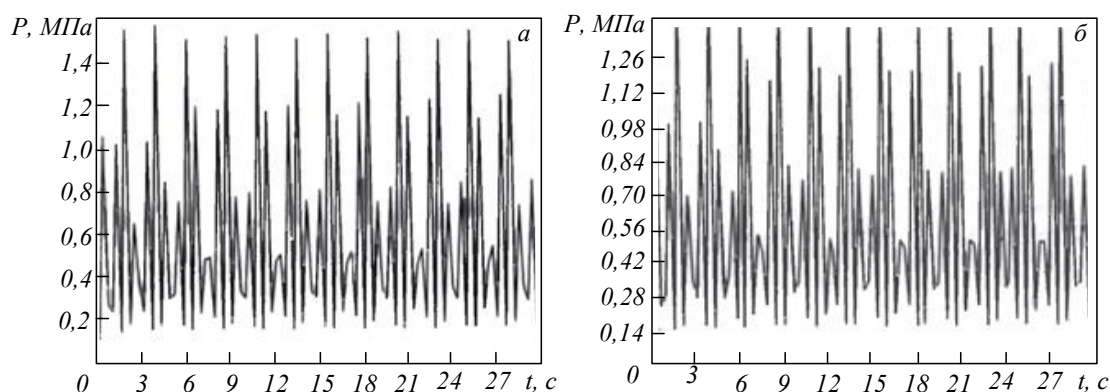


Рис. 4. Изменение давления азота перед (а) и в критическом сечении сопла Лавалья (б) в процессе газопорошковой раздувки шлака

Fig. 4. Change in nitrogen pressure in front (a) and in the critical section of the Laval (b) nozzle during gas-powder slag blowing

участка трубопровода от входного сечения до сопла Лавалья смесителя; $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_7, \rho_8, \rho_{10}, \rho_{13}, \rho_{16}, \rho_{20}, \rho_{25}, \rho_{29}, \rho_{40}$ – плотность потока на соответствующих участках трубопровода; P_4 – давление азота на входе в сопло Лавалья смесителя; D_2 – внутренний диаметр продувочной фурмы; Q_6 – расход азота через критическое сечение сопла Лавалья смесительного устройства; R_{N_2} – газовая постоянная; T_{N_2} – температура азота; δ – толщина пограничного слоя; D_7, D_8 – диаметр продувочной фурмы после смесителя и перед соплами Лавалья соответственно; Q_{10} – расход азота через выходное сечение сопла Лавалья смесительного устройства; P_{13} – давление азота перед продувочными соплами Лавалья; D_6 – диаметр критического сечения сопла Лавалья смесительного устройства; L_6 – длина сопла Лавалья смесителя; P_{11} – давление азота, транспортирующего магнетитовый порошковый материал; D_{10} – диаметр выходного сечения сопла Лавалья смесительного устройства; L_{10} – высота камеры смесителя; $Q_{16}, Q_{20}, Q_{25}, Q_{29}$ – расход азота через критические сечения продувочных сопел Лава-

ля; $D_{16}, D_{20}, D_{25}, D_{29}$ – диаметры критических сечений продувочных сопел Лавалья; L_{13} – длина фурмы от устья сопла смесительного устройства до продувочных сопел Лавалья; $L_{16}, L_{20}, L_{25}, L_{29}$ – длина продувочных сопел Лавалья; P_{22} – давление азота на выходе из продувочных сопел Лавалья; V_{22} – объем газовой фазы в кислородном конвертере; Q_{40} – расход азота через горловину конвертера; v_{33}, v_{37} – скорости движения шлаковой эмульсии; M_1, M_2 – масса известково-шлаковой эмульсии, перемещающийся к футеровке в различных частях конвертера; R_{d1}, R_{d3} – показатели, отражающие потери механической энергии при трении шлака о футеровку; I_{11}, I_{22} – показатели, отражающие инерционность потоков известково-шлаковой смеси; D_{40} – диаметр горловины конвертера; L_{40} – длина горловины конвертера.

Решение системы уравнений проводится при следующих начальных условиях:

$$Q_{1(t=0)} = Q_{6(t=0)} = Q_{20(t=0)} = Q_{25(t=0)} = Q_{29(t=0)} = Q_{40(t=0)} = 0; \\ P_{4(t=0)} = P_{13(t=0)} = P_{22(t=0)} = 0; v_{33(t=0)} = v_{37(t=0)} = 0.$$

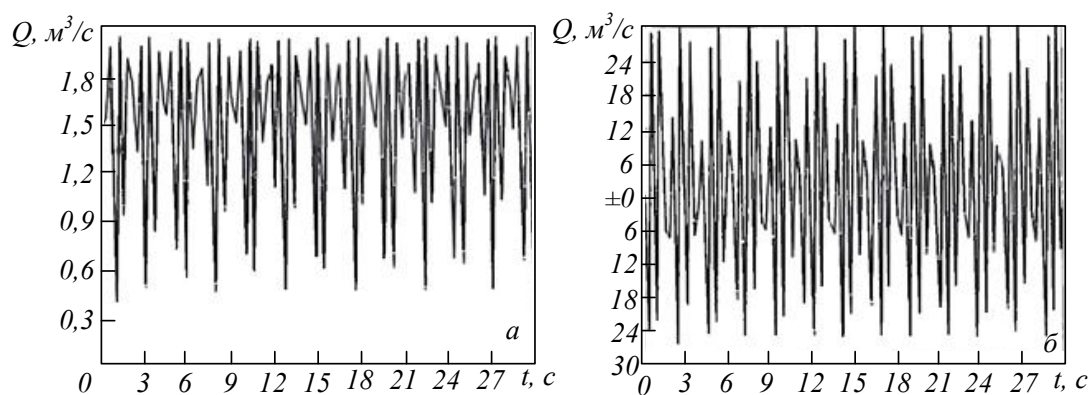


Рис. 5. Изменение расхода азота на входном участке фурмы (а) и в критическом сечении (б) сопла Лавалья в процессе газопорошковой раздувки шлака

Fig. 5. Change in nitrogen consumption at the inlet section of the tuyere (a) and in the critical section (b) of the Laval nozzle during gas-powder slag blowing

Результаты моделирования и их обсуждения

Моделирование проводили для условий большегрузного кислородного конвертера емкостью 350 т. Использовали следующие численные значения входных параметров: $P_D = 1,3$ МПа; $P_{11} = 0,6$ МПа; $P_{22} = 0,1$ МПа; $R_{N_2} = 297$ Дж/(кг·К); $T_{N_2} = 300$ К; $\xi_2 = 0,4$; $D_2 = 0,203$ м; $L_2 = 20$ м; $D_6 = 0,125$ м; $L_6 = 0,01$ м; $D_{10} = 0,058$ м; $D_{16} = D_{20} = D_{25} = D_{29} = 0,061$ м; $L_{16} = L_{20} = L_{25} = L_{29} = 0,01$ м; $V_2 = 227$ м³; $\xi_{16} = \xi_{20} = \xi_{25} = \xi_{29} = 0,0355$; $m_{11} = m_{22} = 300$ кг; $R_{11} = R_{22} = 6 \cdot 10^4$ кг/с; $\xi_{40} = 0,6$; $D_{40} = 0,4$ м; $L_{40} = 0,5$ м.

Результаты численного моделирования (рис. 4 – 6) свидетельствуют о наличии пульсационного режима работы в процессе газопорошковой раздувки шлака на футеровку конвертеров. При этом период указанных пульсаций составляет порядка 3 с и имеет место периодическое изменение амплитуд. Механизм указанного изменения амплитуд расходов газа и газопорошковой смеси обусловлен наличием диссипативных структур, которые приводят к флуктуациям, вызывающим резонансные явления при переходах от одной структуры к другой.

В целом полученные результаты позволяют утверждать, что функционирование моделируемой системы фурма – газопорошковая взвесь – шлак – футеровка сопровождается наличием различных динамических режимов в зависимости от соотношения требуемой и подаваемой энергии. При оптимальном соотношении требуемой и подаваемой энергии имеет место режим устойчивой пульсации; именно при реализации такого режима происходит нанесение шлако-порошковой смеси на футеровку конвертера. В случае недостатка подаваемой энергии реализуется режим оседания шлако-порошковой смеси в шлаковую ванну, а при избытке подаваемой энергии – режим выноса шлако-порошковой смеси из конвертера.

Адекватность полученных данных численного моделирования подтверждена путем сравнения с фактически измеренными параметрами в условиях работы промышленного кислородно-конвертерного цеха.

Представленная модель газогидродинамических процессов, протекающих при ошлаковании футеровки с использованием гарнисажной фурмы, а также результаты численного моделирования, полученные применительно к условиям промышленного большегрузного конвертера, являются теоретической базой для обоснования направлений совершенствования технологических режимов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров.

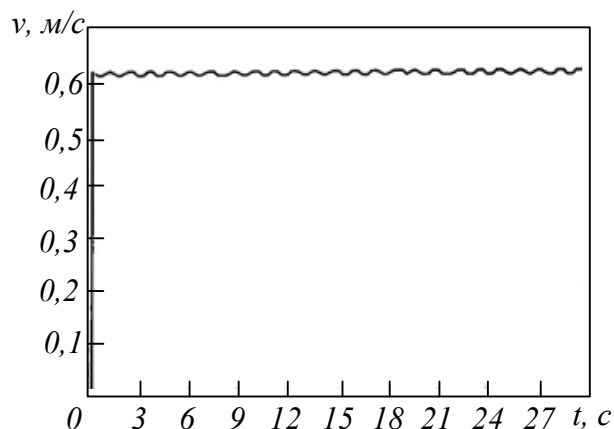


Рис. 6. Изменение скорости движения шлака в процессе газопорошковой раздувки

Fig. 6. Changing the slag velocity during gas-powder blowing

Выводы

На основе топологического метода разработан математическая модель ошлакования футеровки с применением гарнисажной фурмы. Проведенным для условий промышленного большегрузного конвертера численным моделированием определены закономерности изменения параметров нанесения шлакового гарнисажа по ходу процесса, в частности определен пульсационный характер процесса и численные характеристики пульсаций. Адекватность полученных данных подтверждена на основании сравнительного анализа с фактическими показателями работы промышленного конвертерного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bugakov M.N., Eremeev A.A., Shchepetova E.A. New experience: increasing the durability of converter lining. *Metallurgist*. 2024;68(4):493–496. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01751-0>
2. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Левчук В.В., Савельев М.В., Котляров А.А., Шевченко О.И. К вопросу об оптимальной стойкости футеровки конвертеров. *Теория и технология металлургического производства*. 2017;2(21):7–10.
3. Серова Л.В., Чудинова Е.В., Хороших М.А. Разработка критериев оценки качества периклазоуглеродистых огнеупоров и их влияние на повышение стойкости футеровок конвертеров. *Черные металлы*. 2015;(5):21–23.
4. Visloguzova E.A., Kashcheev I.D., Zemlyanoi K.G. Analysis of the effect of periclase-carbon refractory quality on converter lining life. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013;54(2):83–87. <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9553-3>
5. Kharlashin P.S., Larionov A.A., Kharin A.K., Chemeris N.O. Theory and practice of flame torcreting a 160-ton oxygen converter lining.

- Refractories and Industrial Ceramics*. 2010;51(4):223–227.
<https://doi.org/10.1007/s11148-010-9295-4>
6. Sidorov E.V., Kochubeev Yu.N., Borisova Yu.A., Murashko E.V., Bosyakova N.A. Torcrete mix of basic composition for converter lining. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;51(6):408–410.
<https://doi.org/10.1007/s11148-011-9338-5>
 7. Бигеев В.А., Колесников Ю.А., Потапова М.В., Потапов М.Г., Юдина С.В. Технологическая оценка влияния гарнисажа на параметры плавки стали в конвертере. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019;75(5):583–589.
 8. Вислогузова Э.А., Устенко А.С. Опыт использования MgO-содержащих материалов для наведения гарнисажа на футеровку конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2007;3:59–60.
 9. Changhai Lv., Jing Li., Wei Ya., Chen Ya., Renxiang Lv. Study on the protective effect of the dense slag layer on converter lining. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2022;19(1):592–603.
<https://doi.org/10.1111/ijac.13910>
 10. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during splashing to improve lining resistance. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;59(4):403–409.
<https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>
 11. Suvorov S.A., Kozlov V.V. Planning of skull formation at an oxygen converter lining surface and optimization of modifier consumption. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;52(1):29–31.
<https://doi.org/10.1007/s11148-011-9358-1>
 12. Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
<https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000246>
 13. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Смирнов А.Л. Особенности формирования и фазово-минералогический состав конвертерных шлаков. *Металлы*. 2015;(2):26–34.
 14. Zhou Ch., Chen Q., Ji Yi., Ai L., Wang Sh., Chen Q., Yuan T. Effect of highly oxidizing converter dephosphorization slag on dephosphorization behaviour of molten steel. *Ironmaking & Steelmaking*. 2023;50(3):1–11.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2168344>
 15. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В., Чубин К.И., Чубина Е.А. Нетрадиционные технологии и фурменные устройства для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Сталь*. 2017;6:15–20.
 16. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Сигарев Е.Н. Новые технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(6):7–12.
 17. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Протопопов Е.В., Шеремет В.А., Чернятевич И.В., Чубин К.И. Освоение технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера путем раздувки шлака перемещающимися газопорошковыми струями. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;(2):15–20.
 18. Харлашин П.С., Ассиил М.К. Моделирование тепловой работы футеровки 160 т кислородного конвертера с учетом гарнисажа. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2014;(28):48–54.
 19. Zhang H., Zhao H., Yuan Zh., Xu B., Liu K., Zhao L., Kong D. Thermodynamic Evaluation of Enhanced CO₂ Conversion in Innovative Slag Splashing Processes in Converters. *Steel Research International*. 2025;96(9):310–320.
<https://doi.org/10.1002/srin.202400918>
 20. Галиуллин Т.Р., Протопопов Е.В., Соколов В.В., Чернятевич А.Г. Гидрогазодинамические особенности раздувки шлаковой ванны при нанесении гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2008;4:16–23.
 21. Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
<https://doi.org/10.3390/met13050940>
 22. Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(2):864–879.
<https://doi.org/10.1007/s40831-024-00836-z>
 23. Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024.
<https://doi.org/10.1002/srin.202400289>

REFERENCES

1. Bugakov M.N., Eremeev A.A., Shchepetova E.A. New experience: increasing the durability of converter lining. *Metallurgist*. 2024;68(4):493–496.
<https://doi.org/10.1007/s11015-024-01751-0>
2. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Levchuk V.V., Savell'ev M.V., Kotlyarov A.A., Shevchenko O.I.

- On the issue of optimal durability of converter linings. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2017;2(21):7–10. (In Russ.).
3. Serova L.V., Chudinova E.V., Khoroshikh M.A. Development of criteria for assessing the quality of periclase-carbon refractories and their impact on increasing the durability of converter linings. *Chernye metally*. 2015;(5):21–23. (In Russ.).
 4. Visloguzova E.A., Kashcheev I.D., Zemlyanoi K.G. Analysis of the effect of periclase-carbon refractory quality on converter lining life. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013;54(2):83–87.
<https://doi.org/10.1007/s11148-013-9553-3>
 5. Kharlashin P.S., Larionov A.A., Kharin A.K., Chemeris N.O. Theory and practice of flame torcreting a 160-ton oxygen converter lining. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2010;51(4):223–227.
<https://doi.org/10.1007/s11148-010-9295-4>
 6. Sidorov E.V., Kochubeev Yu.N., Borisova Yu.A., Murashko E.V., Bosyakova N.A. Torcrete mix of basic composition for converter lining. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;51(6):408–410.
<https://doi.org/10.1007/s11148-011-9338-5>
 7. Bigeev V.A., Kolesnikov Yu.A., Potapova M.V., Potapov M.G., Yudina S.V. Technological assessment of the influence of the skull on the parameters of steel melting in the converter. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ehkonomicheskoi informatsii*. 2019;75(5):583–589. (In Russ.).
 8. Visloguzova E.A., Ustenko A.S. Experience of using MgO-containing materials for lining converters. *Novye ognepupory*. 2007;3:59–60. (In Russ.).
 9. Changhai Lv., Jing Li., Wei Ya., Chen Ya., Renxiang Lv. Study on the protective effect of the dense slag layer on converter lining. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2022;19(1):592–603.
<https://doi.org/10.1111/ijac.13910>
 10. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during splashing to improve lining resistance. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;59(4):403–409.
<https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>
 11. Suvorov S.A., Kozlov V.V. Planning of skull formation at an oxygen converter lining surface and optimization of modifier consumption. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;52(1):29–31.
<https://doi.org/10.1007/s11148-011-9358-1>
 12. Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
<https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000246>
 13. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Smirnov A.L. Features of formation and phase-mineralogical composition of converter slags. *Metally*. 2015;(2):26–34. (In Russ.).
 14. Zhou Ch., Chen Q., Ji Yi., Ai L., Wang Sh., Chen Q., Yuan T. Effect of highly oxidizing converter dephosphorization slag on dephosphorization behaviour of molten steel. *Ironmaking & Steelmaking*. 2023;50(3):1–11.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2168344>
 15. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. Unconventional technologies and tuyere devices for applying slag coating to the converter lining. *Stal'*. 2017;6:15–20. (In Russ.).
 16. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. New technologies for applying slag coating to converter linings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2014;57(6):7–12. (In Russ.).
 17. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Protopopov E.V., Sheremet V.A., Chernyatevich I.V., Chubin K.I. Development of the technology of applying a slag coating to the lining of a converter by blowing the slag with moving gas-powder jets. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2011;(2):15–20. (In Russ.).
 18. Kharlashin P.S., Assil M.K. Modeling the thermal performance of the lining of a 160-ton oxygen converter, taking into account the skull. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2014;(28):48–54. (In Russ.).
 19. Zhang H., Zhao H., Yuan Zh., Xu B., Liu K., Zhao L., Kong D. Thermodynamic Evaluation of Enhanced CO₂ Conversion in Innovative Slag Splashing Processes in Converters. *Steel Research International*. 2025;96(9):310–320.
<https://doi.org/10.1002/srin.202400918>
 20. Galiullin T.R., Protopopov E.V., Sokolov V.V., Chernyatevich A.G. Hydrogasdynamic features of slag bath blowing during the application of a skull coating to the lining of oxygen converters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2008;4:16–23. (In Russ.).
 21. Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
<https://doi.org/10.3390/met13050940>
 22. Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sus-*

tainable Metallurgy. 2024;10(2):864–879.
<https://doi.org/10.1007/s40831-024-00836-z>

23. Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024.
<https://doi.org/10.1002/srin.202400289>

Сведения об авторах:

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Александр Александрович Уманский, д.т.н., директор Института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Сергей Александрович Полежаев, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической

технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sapolezaev@mail.ru

Information about the authors:

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University

E-mail: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

SPIN-код: 2374-4553

Sergey A. Polezhaev, Master's student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: sapolezaev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.2026

После доработки 28.05.2026

Принята к публикации 02.06.2026

Received 07.04.2026

Revised 28.05.2026

Accepted 02.06.2026