

Оригинальная статья

УДК 669.782

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА
В КОНВЕРТЕРАХ С ЖИДКОФАЗНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ**

© 2025 г. **Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, М. К. Шакиров, Е. А. Беленецкий,
С. С. Фатьянов**

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

Аннотация. С точки зрения ресурсосбережения актуальным является совершенствование существующих и разработка новых модификаций конвертерных процессов, в том числе технологии с комбинированной продувкой и элементами жидкофазного восстановления, обеспечивающих переработку различных отходов и экономию материалов при улучшении технико-экономических показателей и экологической обстановки. Представлены основные положения процессов с жидкофазным восстановлением промышленных отходов, предусматривающих двухстадийное газоокислородное рафинирование расплава при пространственном распределении технологических операций в объеме агрегата. Для реализации технологии конвертер должен иметь системы подачи различных технологических газов в расплав, в том числе донного перемешивания инертным газом, с использованием двухпоточных продувочных и боковых фурм. Высокая степень восстановления оксидов железа из техногенных отходов достигается на первой (восстановительной) стадии. На этом этапе в залитый в агрегат чугун присаживают железосодержащие отходы и углеродсодержащие материалы (восстановители). Теоретический анализ процесса позволил выделить основные взаимодействующие фазы и зоны (поверхности) их контакта. Описаны термодинамические и кинетические закономерности протекания реакций жидкофазного восстановления. Скорость процесса окисления – восстановления предложено рассматривать как суммарную скорость процессов окисления железа жидкого чугуна газообразным кислородом и восстановления оксидов железа кремнием, фосфором и углеродом. Определены основные параметры, влияющие на скорость и полноту протекания процесса восстановления оксидов железа перерабатываемых отходов примесными элементами жидкого чугуна, а также дополнительно вводимым углеродсодержащим восстановителем. Предложена математическая модель, описывающая взаимодействие фаз, использование которой позволяет целенаправленно воздействовать на кинетические факторы в зависимости от текущих термодинамических условий и решаемых задач.

Ключевые слова: конвертер, жидкофазное восстановление, комбинированная продувка, шлако-металлическая эмульсия, модель рафинирования

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;1(51):102–109. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)

Original article

**PHYSICO-CHEMICAL MODEL OF REFINING MELT IN LIQUID PHASE
REDUCTION CONVERTERS**

© 2025 **E. V. Protopopov, A. A. Umansky, M. K. Shakirov, E. A. Belenetsky, S. S. Fatyanov**

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

Abstract. From the point of view of resource conservation, it is important to improve existing and develop new modifications of converter processes, including technologies with combined purging and liquid-phase recovery elements, which ensure the processing of various wastes and save materials while improving technical and economic performance and environmental conditions. The main provisions of processes with liquid-phase recovery of industrial waste involving two-stage oxygen-gas refining of the melt with spatial distribution of technological operations in the volume of the unit are presented. To implement the technology, the converter must have systems for supplying various process gases to the melt, including bottom mixing with inert gas, using two-flow purge and side tuyeres. A high degree of reduction of iron oxides from man-made waste is achieved at the first (reducing) stage. At this stage, iron-containing waste and carbon-containing materials (reducing agents) are added to the cast iron poured into the unit. A theoretical analysis of the process made it possible to identify the main interacting phases and the zones (surfaces) of their contact. Thermodynamic and kinetic patterns of liquid-phase reduction reactions are described. The rate of the oxidation–reduction process is proposed to be considered as the total rate of oxidation of iron in liquid cast iron with gaseous oxygen and reduction of iron oxides with silicon, phosphorus and carbon. The main parameters influencing the speed and completeness of the iron oxide reduction process of the processed waste by impurity elements of liquid cast iron, as well as an additional carbon-containing reducing agent, are determined. A mathematical model describing the interaction of phases is proposed, the use of which makes it possible to purposefully influence kinetic factors depending on the current thermodynamic conditions and the tasks being solved.

Keywords: converter, liquid phase reduction, combined purging, slag-metal emulsion, refining model

For citation: Protopopov E.V., Umansky A.A., Shakirov M.K., Belenetsky E.A., Fatyanov S.S. Physico-chemical model of melt refining in liquid-phase reduction converters. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):102–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)

Введение

Для реализации основных направлений развития мировой отрасли [1 – 4] необходимо совершенствование существующих и разработка новых модификаций ресурсо- и энергосберегающих конвертерных процессов, в том числе работающих по технологии с комбинированной продувкой и элементами жидкофазного восстановления, обеспечивающих переработку различных отходов и экономию материалов при улучшении технико-экономических показателей и экологической обстановки [5 – 9]. Успешное решение поставленных проблем невозможно без теоретических и экспериментальных исследований в новых направлениях для создания достоверной физико-химической модели явлений, протекающих при различных способах конвертирования металла и осознанного практического применения полученных данных.

Рациональная оценка определения эффективности использования комплексной технологии в реальных условиях может быть основана на гипотезе баланса железа как основного элемента расплава конвертерной ванны. При этом в основу анализа может быть положена идея определения термодинамической «движущей силы» реакций восстановления железа из шлакометаллической фазы в течение процесса, а также ее изменение с учетом кинетических факторов [10 – 12].

Железо (химический элемент) является основой металлозавалки в любом сталеплавильном процессе

и по ходу плавки в определенном количестве переходит в окисленной форме в шлаковую фазу, частично остается в конечном шлаке, что приводит к потерям металла [13]. Возможны и другие потери железа: при выбросах шлакометаллической эмульсии из конвертера; испарение железа в высокотемпературной реакционной зоне; дополнительные потери при выносе и сворачивании шлака [7; 9; 14]. Все эти негативные явления связаны с текущим изменением содержания оксидов железа в шлаке, которое оказывает влияние не только на закономерности протекания основных физико-химических превращений, но и на целый ряд важнейших показателей (на выход жидкой стали). В случае реализации процесса с жидкофазным восстановлением предусматривается ввод значительного количества железосодержащих промышленных отходов в ванну по ходу продувки.

Методика исследований

Для обеспечения максимального восстановления железа из оксидов при переработке техногенных отходов в шлаковой ванне разработана технология конвертерной плавки (рис. 1), предусматривающая двухстадийное газокислородное рафинирование расплава с элементами жидкофазного восстановления [15]:

1. Восстановительная стадия – обеспечивает высокую степень восстановления железа из шлаковых концентратов, техногенных отходов,

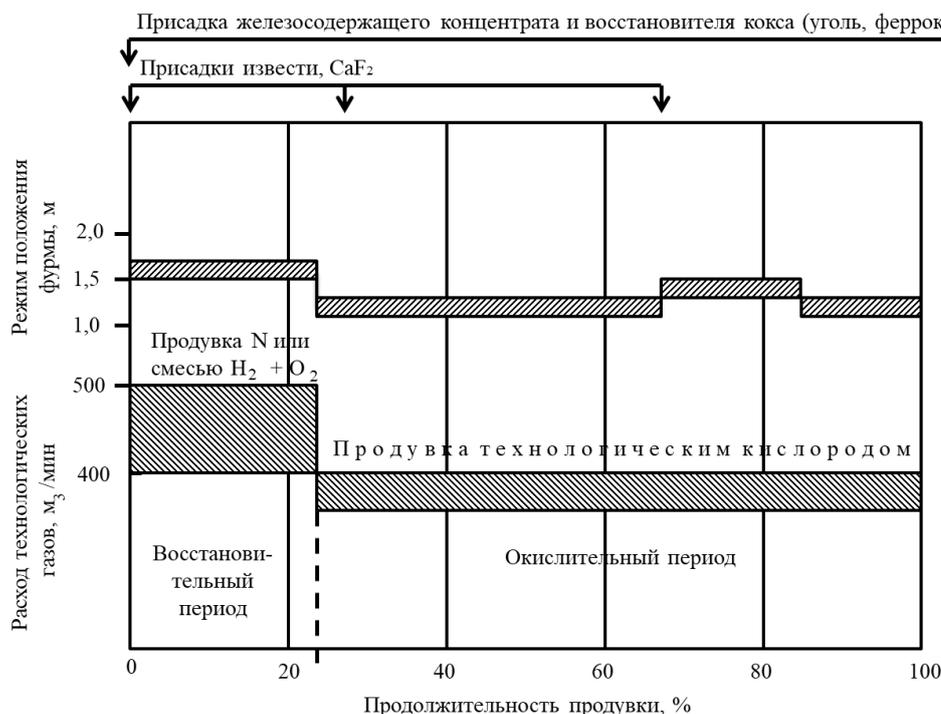


Рис. 1. Технологический режим двустадийной конвертерной плавки с элементами жидкофазного восстановления
Fig. 1. Technological mode of two-stage converter melting with elements of liquid phase reduction

шлакостальных коржей. Для этого в залитый в агрегат чугун («подложка») присаживают железосодержащие отходы и углеродсодержащие материалы – восстановители (кокс, феррококс, антрацит и другие), для интенсификации массообменных процессов при восстановлении расплав интенсивно перемешивается азотом или газокислородной смесью.

2. Реализуется окислительная продувка по разработанному дутьевому и шлаковому режимам плавки.

Принципиальная схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением техногенных отходов и дожиганием отходящих газов в полости агрегата представлена на рис. 2.

В рассматриваемом случае конвертер с комбинированной продувкой должен быть оборудован системой донного перемешивания нейтральными газами, подачей через боковые фурмы газообразного топлива для интенсификации массообменных процессов в ванне и для улучшения теплового баланса плавки.

Важным элементом технологии следует считать использование специальных конструкций дутьевых устройств, обеспечивающих дожигание в рабочем пространстве отходящих газов [9; 16 – 19].

Выделенными реакционными зонами восстановления будут следующие: 1 – поверхность контакта всплывающих частиц железосодержащих отходов (ЖО) с жидким чугуном; 2 – поверхность контакта всплывающих капель шлака

(ШЛ) с жидким чугуном; 3 – поверхность контакта всплывающих капель шлака с взвешенным в расплаве углеродсодержащим материалом (УМ); 4 – поверхность контакта шлака с жидким чугуном; 5 – поверхность контакта шлака с взвешенными в расплаве углеродсодержащими материалами.

Можно выделить следующие взаимодействующие фазы:

I – жидкий чугун, который будет являться начальной «емкостью» тепла и постоянным гетерогенным многофазным расплавом для восстановления железа [9];

II – твердая смесь из железосодержащего концентрата и восстановителя – углерода (антрацит, энергетический уголь, угольная пыль, феррококс), в которой протекают основные восстановительные процессы; впоследствии выделяются жидкие фазы (оксидная (шлак) и металлическая (на основе железа)), которые переходят в фазу *I*;

III – газовая фаза (зона смешения продуктов конверсии) природного газа и горения оксида углерода CO и водорода; распределена практически по всему внутреннему объему над жидкими фазами расплава; в этой зоне предусматривается подача технологических газов через верхнюю основную и вспомогательные фурмы в зону смешения отходящих газов, в оксидную фазу и через донные фурмы в металлическую фазу;

IV – разделительная «вспомогательная» фаза, твердый углерод (восстановитель и топливо)

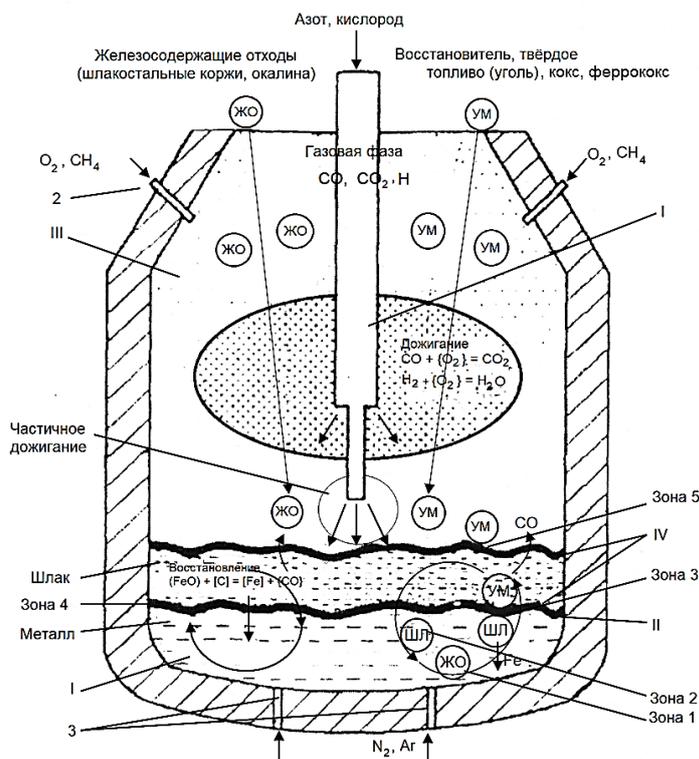


Рис. 2. Схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением железосодержащих материалов:
 1 – верхняя двухпоточная кислородная фурма; 2 – боковые фурмы (O₂, CH₄); 3 – донные фурмы (N₂, Ar, O₂, CO)
 Fig. 2. Diagram of the converter process with liquid-phase reduction of iron-containing materials:
 1 – upper double-flow oxygen tuyere; 2 – side tuyeres (O₂, CH₄); 3 – bottom tuyeres (N₂, Ar, O₂, CO)

состоит из двух условных областей (в нижней части между металлической (I) и оксидной (II) фазами), где поддерживается концентрация углерода в металле на уровне насыщения и обеспечивается восстановление железа из его оксида. В верхней области между зонами смешения газов и оксидов проходит условная граница раздела пространства с преобладанием восстановительных (II) и окислительных (III) свойств; кроме того, в зоне IV определенная часть углерода окисляется при взаимодействии с кислородом технологических газов и служит дополнительным источником тепла.

Для описания исследуемого объекта, в частности для оценки текущего содержания оксидов железа в активно барботируемом расплаве с развитой межфазной поверхностью, использовали подходы, рассмотренные в работах [13; 20].

При разработке математической модели процесса жидкофазного восстановления учитывали, что содержание оксидов железа в ванне изменяется в результате протекания на условной границе раздела металла и шлака двух противоположно направленных процессов: окисления железа со скоростью W_1 на поверхности контакта жидкого металла с потоком окислительного газа (струи кислорода) и восстановления железа из его оксида со скоростью W_2 в начале кремнием, а затем фосфором и углеродом, растворенными в

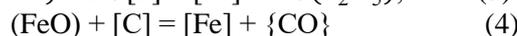
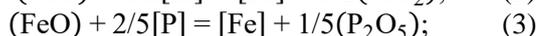
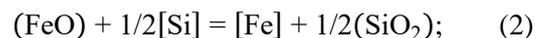
жидком чугуне, и дополнительно введенным углеродсодержащим восстановителем (например, феррококсом).

Для промышленных агрегатов скорость W_1 образования оксида железа (скорость окисления железа) будет определяться в основном объемной скоростью q подачи окислительного газа [10; 21]:

$$W_1 = 80\alpha_0 x_{\text{ок}}^{\text{нач}} q x_{\text{Fe}}, \quad (1)$$

где α_0 – степень использования окислителя, доля от единицы; $x_{\text{ок}}^{\text{нач}}$ и x_{Fe} – молярная доля окислителя в исходном газе и железа в металле.

Суммарная скорость противоположного процесса – восстановления оксидов железа по реакциям



будет зависеть не только от термодинамических функций, но и от их кинетических констант и суммарной эффективной площади $S_{\text{эф}}$ контакта жидких металла и шлака. В рассматриваемых условиях особую роль будут играть мероприятия по организации интенсивного перемешивания барботируемой шлакометаллической ванны (рис. 2).

В общем случае смешанного в кинетическом отношении взаимодействия величину W_2 , моль FeO/c, можно определить по следующей формуле:

$$W_2 = S_{\text{эф}} \sum_{i=1}^3 k_i^0 \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \{[i]^{n_i}[(\text{FeO}) - (\text{FeO})_i^*]^{m_i}\}; \quad (5)$$

здесь k_i^0 и E_i – безразмерная предэкспонента константы скорости i -й реакции и ее энергия активации, Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура, К; $[i]$ – содержание компонента i (кремния, фосфора или углерода) в металле, %; (FeO) и $(\text{FeO})_i^*$ – фактическое и равновесное с i -м компонентом содержания оксида железа FeO в шлаке, %; n_i и m_i – порядок реакции по компоненту i и оксиду железа FeO.

Разность между величинами W_1 и W_2 будет определять суммарную скорость изменения содержания оксида железа FeO в шлаке:

$$W = \frac{dn_{\text{FeO}}}{d\tau} = W_1 - W_2. \quad (6)$$

Постановка задачи оптимизации параметров процесса с целью получения минимального конечного содержания оксида железа FeO в шлаке будет определяться условием

$$n_{\text{FeO}}^{\text{кон}} = \int_0^{n_{\text{FeO}}^{\text{кон}}} dn_{\text{FeO}} = \int_0^{\tau_{\text{пр}}} W d\tau = \int_0^{\tau_{\text{пр}}} [(W_1) - (W_2)] d\tau \rightarrow \min, \quad (7)$$

здесь индексы «кон» и «пр» – конечное значение параметров и времени продувки.

Решение задачи оптимизации с использованием уравнения (7) осложняется тем, что не все кинетические константы известны (k_i^0 , E_i , n_i и m_i). Для качественного анализа можно предложить упрощенную кинетическую теорию гетерогенных реакций между двумя жидкими фазами [11]. Суть этой кинетической теории заключается в том, что гетерогенные реакции типа (а) – (б) лимитируются медленными стадиями диффузии одного из компонентов в одной из фаз [10; 11]. При этом наиболее простую форму кинетическое уравнение (5) приобретает в случае малой скорости диффузии оксида железа FeO в шлаковой фазе, а это один из наиболее вероятных вариантов, так как константы равновесия реакций взаимодействия оксида железа FeO с кремнием, фосфором и углеродом достаточно велики и поэтому торможение реакций диффузией их продуктов маловероятно. При таком предположении кинетические уравнения реакции восстановления же-

леза из его оксида каждым из отмеченных элементов (восстановителей) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W_2^{\text{Si}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{Si}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{Si}}^*]; \\ W_2^{\text{P}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{P}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{P}}^*]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом суммарное уравнение будет иметь вид:

$$W_2 = W_2^{\text{Si}} + W_2^{\text{P}} + W_2^{\text{C}} = 3\nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} \times \left\{ (\text{FeO}) - \frac{1}{3} [(\text{FeO})_{\text{Si}}^* + (\text{FeO})_{\text{P}}^* + (\text{FeO})_{\text{C}}^*] \right\}; \quad (11)$$

здесь $\beta_j = D_i/\delta_i$ – константа скорости массоотдачи, м/с; D_i – коэффициент диффузии компонента, м²/с; δ_i – эффективная толщина пограничного диффузионного слоя, м; ν – одинаковая для всех компонентов константа конвекции, с^{-0,5} [10; 21].

Движущая сила каждой из реакций восстановления железа из оксида FeO, кроме текущего содержания последнего, определяется равновесной с восстановителем величиной $(\text{FeO})_i^*$, которая в свою очередь связана с рассчитываемой по табличным термодинамическим данным константой равновесия K соответствующей реакции:

$$K_a = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{SiO}_2}^{1/2}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{Si}}^{1/2}} = f_a(T); \quad (12)$$

$$K_b = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{P}_2\text{O}_5}^{1/5}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{P}}^{2/5}} = f_b(T); \quad (13)$$

$$K_c = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{CO}}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{C}}} = f_c(T). \quad (14)$$

где α_j – активность компонента j .

Результаты и их обсуждение

Использование уравнений (1), (7) и (11) позволяет решать задачу оптимизации процесса по тому или иному отмеченному признаку [10; 11]. Если необходимо будет реализовать задачу повышения производительности процесса, необходимо

увеличивать движущую силу и кинетические факторы, то есть оптимизировать развитие процессов восстановления железа из присаженных материалов (техногенных отходов) при создании условий эффективного перемешивания взаимодействующих фаз. При реализации более сложных задач необходимо целенаправленно менять кинетические факторы в отдельные периоды процесса в зависимости от сложившихся термодинамических условий, то есть от движущей силы.

Выводы

На основе современных представлений построено описание процессов, протекающих при переработке твердых железосодержащих отходов с использованием технологии жидкофазного восстановления. Выделены основные взаимодействующие фазы и параметры, определяющие скорость и полноту восстановления оксидов железа. Предлагаемая математическая модель может быть использована при разработке рекомендаций для ведения восстановительной стадии процесса при изменяющихся начальных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jan van der, Louwerse G. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):483–489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
2. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez Salgado U., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*. 2022;12: 466. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Fruehan R. Recycling of Waste Oxides in Steelmaking. *Final Report for Project*. 2000:103. <https://doi.org/10.2172/789632>
4. Singh A.K., Raju M.T., Jha U. Recycling of Basic Oxygen Furnace (BOF) sludge in iron and steel works. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2011;14(1/2/3/4):19–32. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. Москва: Элиз, 2000:64.
6. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономике. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавателей*, Москва – Тула, 15-19 октября 2018 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2018:42–59.
7. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергоэкологические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014:328.
8. Григорович К.В. Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития. В кн.: *Труды XIV международного конгресса сталеплавателей*, Москва – Электросталь, 17-21 октября 2016 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2016:56–65.
9. Протопопов Е.В., Шакиров К.М., Айзатулов Р.С. Обоснование некоторых параметров технологии конвертерной плавки с элементами жидкофазного восстановления. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;12:15–18.
10. Шакиров К.М. *Кинетика гетерогенных процессов. Развернутое кинетическое уравнение быстрых гетерогенных реакций в потоке*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2012:76.
11. Попель С.И., Сотников А.И., Борисенков В.Н. Теория металлургических процессов. Москва: Металлургия, 1986:463.
12. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steelmaking furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
13. Огороков Б.Н. *Линейная энергодинамика открытых систем сталеплавильных процессов*. Москва: Металлургиздат, 2021:520.
14. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А., Шакиров К.М., Ганзер Л.А. Исследование гидродинамики конвертерной ванны при продувке расплава в агрегате жидкофазного восстановления. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2006;(6):7–11.
15. Пат. 2107737 РФ. Способ выплавки стали в конвертере / Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, В.В. Соколов и др.; заявл. 26.02.97; опубл. 27.03.98.
16. Жибинова И.А., Шакиров К.М., Протопопов Е.В., Шакиров М.К. Термодинамическое обоснование технологии жидкофазного восстановления оксидных материалов в условиях кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;(2):17–20.
17. Chen, J.D., Zhang C.J. and Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
18. Ray S.K., Gautam Chattopadhyay G., Asim K. Ray A.K. Evaluation of Dust Generated from Basic Oxygen Furnace Steel Making. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1997.47(6):716–721. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463929>

19. Pal J., Ghorai S., Singh D. P. Performance Assessment of CO₂ Treated Fluxed Iron Oxide Pellets in Basic Oxygen Steel Making Process. *ISIJ International*. 2010;50(1):105–114.
20. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
21. Жибинова И.А., Шакиров К.М., Протопопов Е.В., Пошевнева А.И. Термодинамический анализ реакций восстановления железа и марганца из их монооксидов примесями металла в условиях «подавляющего» окисления железа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;(2):3–6.

REFERENCES

1. Jan van der, Louwense G. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):483–489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
2. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez Salgado U., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*. 2022;12: 466. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Fruehan R. Recycling of Waste Oxides in Steelmaking. *Final Report for Project*. 2000:103. <https://doi.org/10.2172/789632>
4. Singh A.K., Raju M.T., Jha U. Recycling of Basic Oxygen Furnace (BOF) sludge in iron and steel works. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2011;14(1/2/3/4):19–32. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative characteristics of oxygen converter steel production in Russia and abroad*. Moscow: Eliz, 2000:64. (In Russ.).
6. Grigorovich K.V. The current state of ferrous metallurgy and the directions of its development in the digital economy. In: *Proceedings of the XV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Tula, October 15-19, 2018, Moscow: OOO «RPK PrintAP», 2018:42–59. (In Russ.).
7. Merker E.E., Karpenko G.A. *Physical processes in the converter and energy-ecological indicators of production*. Stary Oskol: Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii», 2014:328. (In Russ.).
8. Grigorovich K.V. Metallurgy of the XXI century: current state and directions of development. In: *Proceedings of the XIV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Elektrostal, October 17-21, 2016, Moscow: OOO «RPK PrintAP», 2016:56–65. (In Russ.).
9. Protopopov E.V., Shakirov K.M., Aizatulov R.S. Substantiation of certain parameters of the technology of converter melting with elements of liquid phase reduction. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998;12:15–18. (In Russ.).
10. Shakirov K.M. *Kinetics of heterogeneous processes. An expanded kinetic equation of fast heterogeneous reactions in a flow*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2012:76. (In Russ.).
11. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Borisenkov V.N. *Theory of metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya, 1986:463. (In Russ.).
12. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steelmaking furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
13. Okorokov B.N. *Linear energy dynamics of open systems of steelmaking processes*. Moscow: Metallurgizdat, 2021:520. (In Russ.).
14. Mokrinskii A.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Ganzer L.A. Investigation of the hydrodynamics of a converter bath during purging of a melt in a liquid-phase reduction unit. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2006;(6):7–11. (In Russ.).
15. Protopopov E.V., Aizatulov R.S., Sokolov V.V. etc. Method of steel smelting in a converter. Pat. 2107737 RF.; заявл. 26.02.97; opubl. 27.03.98. (In Russ.).
16. Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Protopopov E.V., Shakirov M.K. Thermodynamic substantiation of the technology of liquid-phase reduction of oxide materials in the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2009;(2):17–20. (In Russ.).
17. Chen, J.D., Zhang C.J. and Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
18. Ray S.K., Gautam Chattopadhyay G., Asim K. Ray A.K. Evaluation of Dust Generated from Basic Oxygen Furnace Steel Making. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1997.47(6):716–721. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463929>
19. Pal J., Ghorai S., Singh D. P. Performance Assessment of CO₂ Treated Fluxed Iron Oxide Pellets in Basic Oxygen Steel Making Process. *ISIJ International*. 2010;50(1):105–114.
20. Dering D, Swartz C, Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>

21. Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Protopopov E.V., Poshevneva A.I. Thermodynamic analysis of reactions of reduction of iron and manganese from their monoxides by metal impurities under conditions of "suppressive" oxidation of iron. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2005;(2):3–6. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

SPIN-код: 2374-4553

Максим Кимович Шакиров, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: shakirov.maxim@mail.ru

ORCID: 0009-0007-4938-5975

Евгений Анатольевич Беленецкий, магистрант кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: info@vpk-oil.ru

Сергей Сергеевич Фатьянов, магистрант кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors

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

Email: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Email: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

SPIN-код: 2374-4553

Maksim K. Shakirov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

E-mail: shakirov.maxim@mail.ru

ORCID: 0009-0007-4938-5975

Sergey Sergeevich Fatyanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Evgeny A. Belenetski, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: info@vpk-oil.ru

Sergey S. Fat'yanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.01.2025

После доработки 24.02.2025

Принята к публикации 26.02.2025

Received 27.01.2025

Revised 24.02.2025

Accepted 26.02.2025