

Оригинальная статья

УДК 669.184.244.62

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-2(56)-106-114

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШЛАКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАСТЫЛЕЙ НА СТВОЛЕ ДВУХЪЯРУСНЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ ПРИ ПРОДУВКЕ В БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ

© 2026 г. Е. В. Протопопов, С. С. Фатьянов, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Рассмотрены основные технологические особенности конвертерной плавки при использовании для продувки двухъярусных кислородных фурм. Проанализированы причины формирования металлошлаковых настывов на стволе фурмы при верхней продувке расплава в большегрузных конвертерах в зависимости от особенностей организации дутьевого режима и различном уровне вспененной шлакометаллической эмульсии в рабочем пространстве агрегата. Предложена сопряженная трехмерная математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в шлаковой и металлической фазах конвертера, которая может быть использована для изучения закономерностей формирования и направленности циркуляционных потоков расплава в ванне при положениях двухъярусной фурмы, количестве сопел в нижнем и верхнем ярусах, углах наклона сопел, расходах кислорода через ярусы сопел и прочих конструктивных и технологических параметрах. Сформулирована физическая модель и выполнено численное моделирование процесса продувки металла в конвертере емкостью 350 т с использованием двухъярусной фурмы с четырьмя соплами Лаваля в нижнем наконечнике и двенадцатью соплами в верхнем ярусе. Представленные данные позволяют получить достоверную информацию о характере движения металлической и газошлаковой фаз при продувке в конвертере и механизме образования шлакометаллической настыва на стволе фурмы.

Ключевые слова: конвертер, кислородная продувка, двухъярусная фурма, гидрогазодинамика ванны, математическая модель, шлакометаллическая настыв

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Протопопов Е.В., Фатьянов С.С., Запольская Е.М. Моделирование процесса формирования шлакометаллических настывов на стволе двухъярусных кислородных фурм при продувке в большегрузных конвертерах. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;2(56):106–114. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-106-114](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-106-114)

Original article

MODELING OF THE FORMATION OF SLAG-METAL SUPPORTS ON THE TRUNK OF TWO-TIER OXYGEN TUYERES DURING PURGING IN HEAVY-DUTY CONVERTERS

© 2026 E. V. Protopopov, S. S. Fat'yanov, E. M. Zapolskaya

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

Abstract. The main technological features of converter melting when used for purging two-tier hydrogen tuyeres are considered. The reasons for the formation of metal slag deposits on the tuyere trunk during upper purging of the melt in heavy-duty converters are analyzed, depending on the specifics of the organization of the blast regime and the different level of foamed slag-metal emulsion in the working space of the unit. A conjugated three-dimensional mathematical model of hydrodynamic and mass transfer processes in the slag and metal phases of the converter is

proposed, which can be used to study the patterns of formation and direction of melt circulation flows in a bath at the positions of a two-tier tuyere, the number of nozzles in the lower and upper tiers, the angles of inclination of the nozzles, oxygen consumption through the tiers of nozzles and other design and technological parameters. A physical model is formulated and numerical simulation of the metal purging process in a 350 ton converter is performed using a two-tiered tuyere with four Laval nozzles in the lower tier and twelve nozzles in the upper tier. The presented data make it possible to obtain reliable information about the nature of the movement of the metal and slag phases during purging in the converter and the mechanism of formation of slag-metal deposits on the tuyere trunk.

Keywords: converter, oxygen purge, two-tier tuyere, hydrogas dynamics of the bath, mathematical model, slag-metal flooring

Financing. Research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Protopopov E.V., Fat'yanov S.S., Zapolskaya E.M. Modeling of the formation of slag-metal supports on the trunk of two-tier oxygen tuyeres during purging in heavy-duty converters. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;2(56):106–114. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-106-114](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-106-114)

Введение

Эффективность реализации технологической концепции конвертерной плавки при получении в агрегате металлического полупродукта прежде всего связывают с полнотой использования энергетических возможностей самого процесса. Поэтому использование наиболее энергоэффективных способов оптимизации теплового баланса плавки и увеличения теплосодержания конвертерной ванны привлекают все большее внимание [1 – 5].

Возвращающийся интерес специалистов к использованию малозатратных вариантов комбинированной продувки расплава с донным перемешиванием нейтральными газами предусматривает прежде всего использование для совершенствования теплового баланса и энергосбережения специальных конструкций дутьевых устройств, обеспечивающих дожигание отходящих газов в полости конвертера [6 – 10].

В рассматриваемых условиях дожигание CO и CO₂ следует считать наиболее предпочтительным способом (рис. 1), поскольку при этом не требуется реконструкции агрегата, использования дополнительных теплоносителей и является экономичным методом с минимальными энергозатратами [9 – 12].

Для реализации такого технологического приема наиболее эффективно применение специальных двухъярусных (двухконтурных) кислородных фурм, конструктивные характеристики и дутьевые режимы которых достаточно широко представлены в работах [12 – 17]. При этом в большинстве исследований отмечается, что для обеспечения достаточной стойкости таких дутьевых устройств необходимо решение проблемы настылеобразования на стволе фурмы в процессе конвертерной операции.

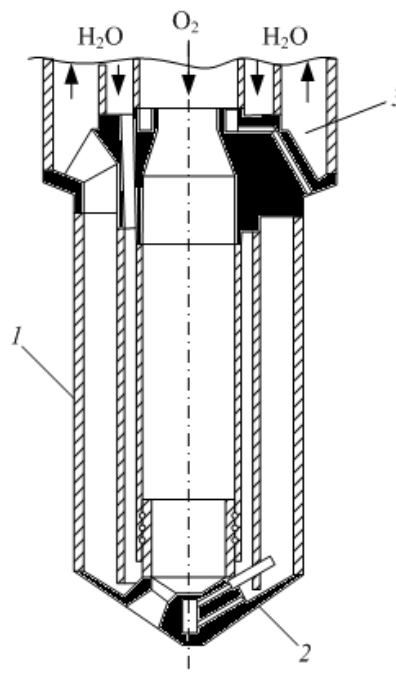


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции двухъярусной фурмы для дожигания отходящих газов в полости конвертера: 1 – двухъярусная фурма; 2, 3 – ярусы подачи газовых струй на продувку

Fig. 1. Schematic diagram of the design of a two-tiered tuyere for afterburning exhaust gases in the cavity of the converter: 1 – two-tiered tuyere; 2, 3 – tiers of gas jet supply for purging

В тоже время следует отметить, что теоретическое обоснование и рекомендации для реализации процесса дожигания отходящих газов в полости конвертера продолжает оставаться предметом многочисленных дискуссий, до сих пор недостаточно изучен и, как правило, связывают с известной сложностью проведения натурных производственных экспериментов. В рассматриваемых условиях использование возможностей математического моделирования и численных

экспериментов позволяет значительно расширить знания при решении поставленных задач.

В дальнейшем при формировании физико-химической модели процесса дожигания отходящих газов с использованием разработанной конструкции двухъярусной фурмы учитывали ранее полученные сведения [3; 6; 11; 17 – 20].

Методы и результаты исследований

Газодинамическая обстановка в рабочем пространстве конвертера образует сложную пространственную структуру турбулентных вихревых течений, крайне сложную для теоретического анализа. В связи с этим прикладной расчет течения газов всегда сопряжен с выбором гипотез и допущений, упрощающих вычисление путем использования априорной информации о характере распределения скоростей, давлений и других параметров по объему конвертера.

При разработке модели и расчете течения газов использовали следующие предположения и допущения.

С целью идеализации геометрии рабочего пространства принимали, что конвертер имеет цилиндрическую форму, кислородная фурма находится на оси симметрии агрегата, причем ее диаметр мал по сравнению с диаметром конвертера. Контакт продуваемого газа с расплавом происходит по горизонтальной поверхности, а выход газов из агрегата осуществляется через горловину, имеющую форму окружности (рис. 2).

Предусматривается осевая симметрия потока, поэтому как средние, так и пульсационные составляющие скорости, давления и температуры не зависят от окружной координаты. При этом окружные составляющие средней и pulsa-

ционной скоростей не учитываются. Течение стационарно в макроскопическом масштабе времени, а пульсационные скорости подчиняются гипотезе Прандтля. Предполагаем, что в любой точке объема конвертера имеются только кислород, моно- и диоксид углерода в концентрациях, определяемых динамикой течения. Кислород, подаваемый через сопла нижнего яруса на окисление примесей и рафинирование, на границе контакта газ – расплав полностью поглощается ванной, из которой выделяется смесь монооксида и диоксида углерода в известном соотношении объемных долей.

Указанные упрощения приводят к некоторому искажению реальной пространственной картины течения газов в конвертере, что, вероятно, может повлечь погрешность при определении полей температур и концентрации газов, а также потребует введения на последующих этапах расчета поправочных коэффициентов, определяемых из эксперимента. Расчет течения газов в конвертере позволяет получить пульсационные составляющие скоростей, необходимые для определения полей температур и химически равновесных концентраций газов.

Выполненный анализ работ [6 – 11] и полученные экспериментальные данные [13; 15] показывают, что при подаче дополнительного кислорода на дожигание отходящих газов через сопла верхнего яруса фурмы с расходом 10 – 30 % от общего расхода кислорода на продувку приводит, как правило, к обеспечению эффективного дожигания, повышению температуры и окисленности шлаковой фазы. В тоже время отмеченные результаты сопровождаются ускоренным износом футеровки верхней части конвертера осложняют

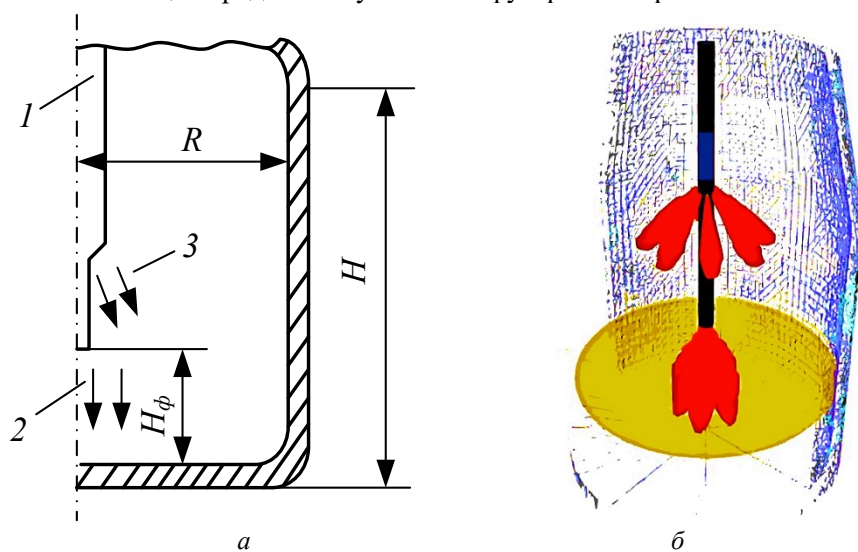


Рис. 2. Расчетная область (а) и объемное расположение двухъярусной фурмы и газовых струй в рабочем пространстве конвертера (б)

Fig. 2. Design area (a) and volumetric arrangement of the two-tier tuyere and gas jets in the working space of the converter (b)

дальнейшую эксплуатацию [1; 3; 21]. По этой причине применение двухъярусных фурм для продувки при таком дутьевом режиме не получило широкого распространения, при этом продувка ванны с меньшим расходом (5 – 10 % кислорода от общего) при подаче через верхний ярус сопел является в рассматриваемом случае оптимальным и характерным для современных условий работы глуходонных конвертеров с двухъярусными фурмами [6; 21 – 23].

Следует отметить, что при постоянном использовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку агрегатов и применении для корректировки шлакового режима известково-магнезиальных флюсов существенно осложняются условия эксплуатации многосопловой кислородной фурмы и другого технологического оборудования. Как правило, в таких условиях продувки формирование более вязких, склонных к «сворачиванию» шлаков, приводит к интенсивному выносу из пределов реакционной зоны мелких капель металла и шлака с образованием настывлей на стволе фурмы, горловине конвертера и экранных поверхностях котла-утилизатора системы газоочистки. При этом удаление металлошлаковых настывлей всегда является трудоемкой операцией, сопряженной со снижением стойкости кислородной фурмы и потерей производительного времени агрегатов.

В условиях когда продувка конвертерной ванны сопровождается значительным выносом капель металла и шлака из зоны продувки, предотвратить интенсивное заматывание ствола фурмы и горловины конвертера возможно при использовании специальных конструкций двухъярусных фурм, обеспечивающих создание над реакционной зоной своеобразной газовой завесы из дополнительного дозвукового кислородного дутья [6; 21 – 24], преграждающего попадание на ствол фурмы капель, выносимых во встречном потоке отходящих газов. При этом важно при наличии вспененного шлака в конвертере обеспечить предотвращение выбросов и оптимальное дожигание отходящих газов с минимизацией локального воздействия высокотемпературных факелов дожигания на футеровку.

К сожалению, на сегодняшний день нет достоверных сведений относительно механизма формирования металлошлаковых настывлей на стволе двухъярусных кислородных фурм, отсутствие, которых в ходе продувки будет дополнительно свидетельствовать в пользу предлагаемой технологии продувки с предотвращением заматывания технологического оборудования. Отсутствие такой информации не позволяет технически гра-

матно оптимизировать конструкции двухъярусных фурм и технологию продувки с их использованием.

В этой связи важным представляется установление особенностей формирования металлошлаковых настывлей на стволе такой фурмы для условий верхней продувки расплава при наличии различного уровня вспененной шлакометаллической эмульсии в полости агрегата. Не менее значимой задачей можно считать вопросы развития существующих квазитрехмерной и трехмерной математических моделей [25 – 27] в направлении обеспечения возможности моделировать продувку с использованием двухъярусной фурмы при режимах подачи кислорода через ярусы сопел, угла их наклона, высоты фурмы над уровнем ванны и расстоянием между ярусами сопел (рис. 2).

Адаптированные к решению подобных задач существующие квазитрехмерная и трехмерные математические модели не позволяют моделировать продувку конвертерной ванны при использовании двухъярусной фурмы [25 – 27]. В значительной степени устранить указанные недостатки может представленная математическая модель сопряженных гидродинамических и массопереносных процессов в объеме конвертера.

Дополнительно при постановке задачи в основу модели приняты следующие исходные допущения в отношении геометрии расчетной области:

- форма реакционной зоны, которая образуется при взаимодействии единичной струи газа с металлом, имеет вид параболоида, поэтому последняя при использовании многосопловой фурмы будет несимметрична;

- уровень металла и шлака в конвертере, а также форма и размеры реакционной зоны не изменяются с течением времени продувки.

Допущения принятые в отношении гидродинамики среды сформированы следующим образом:

- среда в целом считается эффективно сжимаемой за счет наличия источников газовой фазы и ее ненулевой диффузионной скорости течения;

- поверхность шлака стабильна при отсутствии волн и брызг;

- граница сопряжения металлической и газослаковой фаз является условной плоскостью, которая не меняется с течением времени операции;

- присутствуют внешние силовые воздействия в газослаковой фазе (подъемная сила газа).

Принятые дополнительные допущения позволяют описать динамику движения многофазной среды следующей системой уравнений [27]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nu' \Delta \vec{V} - \vec{\nabla} p - \alpha \vec{g}; \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \Phi; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla}(\alpha \vec{V}) + \Phi_{\alpha}, \quad (3)$$

где $\vec{V}$ – барицентрическая скорость движения расплава; α – концентрация газовой фазы в объеме; $\tilde{p}$ – динамическая составляющая давления, нормированная на плотность расплава; ν' – эффективный коэффициент кинематической вязкости среды; $\Phi = \Phi_a - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W})$ – источник дивергенции поля скоростей; $\Phi_a = \Psi_a - \alpha \zeta_{p0} \vec{g} \vec{V}_a$ – эффективный объемный источник концентрации газовой фазы; Ψ_a – объемный источник концентрации газовой фазы, отличный от нуля в зоне контакта вдуваемого кислорода с металлом (граница реакционной зоны) и шлаком в зоне, формирования барботажного режима в местах установки сопел верхнего ряда; $\vec{V}_a = \vec{W} + \vec{V}$ – диффузионная скорость движения газовой фазы; $\vec{g}$ – вектор ускорения свободного падения.

Систему уравнений (1) – (3) необходимо дополнить граничными условиями. На твердых границах для скоростей принимаются условия не протекания и частичного намораживания среды:

$$\vec{V}_\perp|_s = 0; \vec{V}_\parallel|_{s-\delta} = 0,$$

где S – секущая плоскость.

На границе металлической и шлаковой фаз для скоростей принимаются условия не протекания при частичной передаче импульса:

$$\vec{V}_\perp|_s = 0; \vec{V}_\parallel|_{s-\delta} = K_V \vec{V}_\parallel|_{s+\delta},$$

где K_V – коэффициент передачи импульса (в расчетах принимали значения от 0,2 до 1,0); δ – расчетный слой.

По оси симметрии конвертера для скоростей принимаются условия не протекания и свободного скольжения:

$$\vec{V}_\perp|_s = 0; \vec{n} \vec{V}_\parallel|_s = 0,$$

где $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности.

Применяя к системе уравнений (1) – (3) метод расщепления по физическим факторам для несолоидального движения газожидкостных сред [28], получаем следующую схему расщепления:

$$I \quad \vec{V} = \vec{V}^n + \tau R(\vec{V}^n, \alpha^n); \quad (4)$$

$$\alpha^{n+1,0} = \alpha^n, \rho^{n+1,0} = \rho^n, \vec{V}^{n+0,1} = \vec{V}^n; \quad (5)$$

$$II \quad \alpha^{n+1,k+1} = \alpha^n + \tau [-\vec{V}(\alpha^{n+1,k} \vec{V}^{n+1,k}) + \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k})]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} p^{n+1,k+1} = \\ = p^{n+1,k} + \omega \left[\Delta p^{n+1,k} - \frac{\vec{\nabla} \cdot \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k})}{\tau} \right]; \quad (7) \\ \vec{V}^{n+1,k+1} = \vec{V} - \tau \vec{R} p^{n+1,k+1}, \quad (8) \end{aligned}$$

где $R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V} - \vec{R} p' + \nu_e \Delta \vec{V} - \alpha \vec{g}$; τ – шаг по времени; первый и второй верхние индексы – номера временного слоя и итерации; ω – эволюционный параметр, обеспечивающий сходимость процесса.

Тогда эффекты турбулентности описываются трехпараметрической алгебраической моделью, которая включает в себя изотропную составляющую эффективной вязкости, учитывает перенос вихрей вдоль потока и условия их зарождения в соответствии с моделью Л. Прандтля:

$$\nu_e = \nu_0 + \frac{\Delta}{Re_\Delta} V + l^2 \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right|; \quad (9)$$

здесь ν_0 – изотропная составляющая эффективной вязкости; Δ – характерный линейный размер ячейки расчетной сетки; Re_Δ – сеточное число Рейнольдса; V – модуль скорости в ячейке; V – скорость в ячейке; l – длина вектора перемещения; y – расстояние, измеряемое перпендикулярно потоку.

Уравнения усовершенствованной математической модели записываются в цилиндрических координатах и аппроксимируются конечными разностями на шахматной сетке. Полученные алгебраические уравнения, решались методом простой итерации.

Для реализации представленной математической модели разработанное программное обеспечение позволило провести серию численных экспериментов с разными значениями определяющих параметров.

На рис. 2 представлены результаты расчетов для условий продувки расплава в конвертере емкостью 350 т с использованием двухъярусной фурмы при расположении в нижней головке четырех сопел Лавалья диаметром 54 мм, находящихся под углом 15° к вертикальной оси с расходом $1200 - 600 \text{ м}^3/\text{мин}$ и двенадцатью цилиндрическими соплами диаметром 9 мм в верхнем ярусе, расположенными под углом 25° с расходом кислорода на газовую завесу и дожигание $50 - 100 \text{ м}^3/\text{мин}$ [22]. Расстояние между ярусами сопел составляет 2500 мм.

Результаты представлены на половине осевого сечения конвертера с нанесенным разбиением на области (фурма, стенка, металлическая фаза, шлаковая фаза) и с градиентной заливкой, с помощью которой представлена концентрация

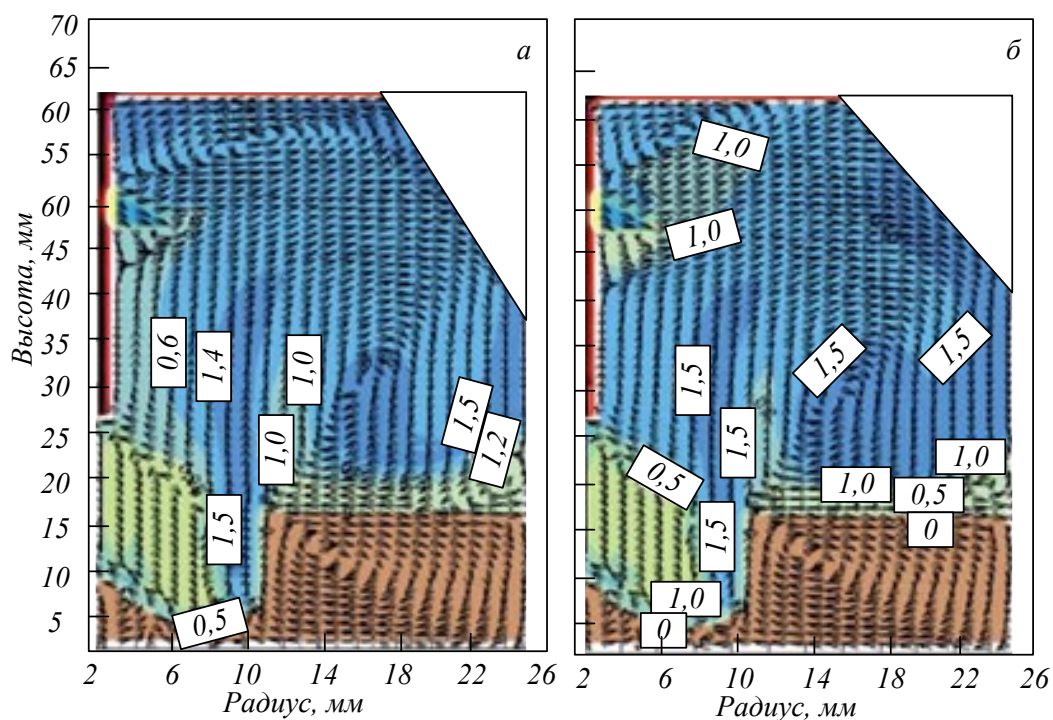


Рис. 3. Результаты расчетов при расходе кислорода через верхний ярус сопел 50 (а) и 100 м³/мин (б) (цифрами обозначены объемные изоконцентрации газа)

Fig. 3. Calculation results for oxygen consumption through the upper tier of nozzles 50 (a) and 100 m³/min (б) (the numbers indicate volumetric gas concentrations)

газовой фазы (рис. 3). Стрелки указывают направление проекции на рассматриваемую плоскость барицентрической скорости движения среды, а радиус и высота вычисляются в ячейках расчетной области.

Приведенные данные позволяют составить представление о характере движения как металлической, так и газошлаковой фаз в конвертере при продувке с использованием двухъярусной фурмы и свидетельствуют о качественной адекватности разработанной математической модели с учетом известных представленных в технической литературе данных высокотемпературного моделирования гидрогазодинамических процессов в рабочем пространстве конвертера и производственных плавок.

Выводы

Исследованы особенности формирования металлошлаковых настывей на стволе разработанной конструкции двухъярусной фурмы с разделенным кислородным потоком при верхней продувке ванны конвертеров емкостью 350 т ККЦ-2 филиала ЗСМК ПАО «ЕВРАЗ». Установлены условия предотвращения интенсивного заметалливания ствола фурмы и горловины конвертера, что является существенным резервом в повышении производительности агрегатов и выхода жидкой стали за счет снижения настывлеобразова-

ния и простоев при удалении настывей. Предложена математическая модель динамики многофазной среды при продувке через двухъярусную фурму, качественно описывающая рассматриваемый процесс и позволяющая изучать закономерности циркуляционных потоков в газошлаковой фазе в конвертере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойченко Б.М., Охотского В.Б., Харлашина П.С. *Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология*. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006:454.
2. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономики. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавателей*. Москва: РПК Принт АП, 2018:42–59.
3. Лякишев Н.П. *Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом*. Москва: Элиз, 2000:64.
4. Kishimoto Y., Saito N. Development and prospect of combined blowing converter in Japan. *Tetsu-to-hagane (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan)*. 2014;100(4):445–455.
5. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*.

- 2004;44(4):770–776.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>
6. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергоэкологические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014:328.
 7. Смирнов Л.А., Бабенко А.А., Данилин Ю.А. и др. Освоение технологии комбинированной продувки в 160-т конвертерах. *Сталь*. 2010;5:43–45.
 8. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Высокотемпературное моделирование процессов тепломассообмена при комбинированной продувке конвертерной ванны. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):100–109.
<http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-100-109>
 9. Stel van der J. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40:483–487.
 10. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
 11. Протопопов Е.В., Лаврик Д.А., Чернятевич А.Г. Повышение эффективности дожигания отходящих газов в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2001;6:13–17.
 12. Ярошенко А.В., Суханов Ю.Ф., Долгих Ю.Н. Оптимизация комбинированной продувки в конвертере с применением нового технического обеспечения. *Сталь*. 2008;8:19–21.
 13. Бабенко А.А., Челпан С.М., Кокаренко О.Н. Заметалливание кислородных продувочных фурм при выплавке стали из углеродистого полупродукта. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;6:33–35.
 14. 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(1-4):19–32.
<https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
 15. Stone R.P., Neith D., Koester S. et al. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceedings*. 2009;1:737–747.
 16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
 17. 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.
 18. Cao L.L., Liu Q., Wang Z., Li N. Interaction behavior between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018;45(3):239–248.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1255373>
 19. 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>
 20. Югов П.И. Современное состояние мировой практики конвертерного производства и научные направления его развития в России. *Черная металлургия*. 2001;9:9–13.
 21. Ughadpada K., Briglio S., Mohammed G. Production improvement of No. 2 BOSP at ESAI. *Iron and Steel Technology*. 2010;11:59–64.
 22. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Филиппенко С.А., Фейлер С.В. Перспективная конструкция кислородной фурмы для конвертеров ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» емкостью 350 т. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2013;(2):4–7.
 23. Stone R.P., Neith D., Koester S. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceeding*. 2009;1:737–747.
 24. 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(3):466.
<https://doi.org/10.3390/met12030466>
 25. Самохвалов С.Е., Сокол А.Н. Квазитрехмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера. *Математическое моделирование*. 2008;2(19):67–70.
 26. Сокол А.Н. Математическое моделирование гидродинамических процессов в полости конвертера во время верхней продувки в трехмерной постановке. *Вестник Херсонского технического университета*. 2010;3(39):448–454.
 27. Самохвалов С.Е., Сокол А.М. Математическое моделирование процессов перемешивания в конвертере. Днепродзержинск: изд. ДДТУ, 2013:99.
 28. Chen J.D., Zhang C.J., Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.

REFERENCES

1. Boichenko B.M., Okhotskogo V.B., Kharlashina P.S. *Converter steel production: theory,*

- technology, steel quality, aggregate designs, material recycling and ecology. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2006:454. (In Russ.).
2. 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: RPK Print AP, 2018:42–59. (In Russ.).
 3. Lyakishev N.P. *Comparative characteristics of the state of oxygen converter steel production in Russia and abroad*. Moscow: Eliz, 2000:64.
 4. Kishimoto Y., Saito N. Development and prospect of combined blowing converter in Japan. *Tetsu-to-hagane (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan)*. 2014;100(4):445–455.
 5. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*. 2004;44(4):770–776.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>
 6. 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.).
 7. Smirnov L.A., Babenko A.A., Danilin YU.A. et al. Mastering the technology of combined purging in 160-ton converters. *Stal'*. 2010;5:43–45. (In Russ.).
 8. Protopopov E.V., Umanskii A.A., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S. High-temperature modeling of heat and mass transfer processes during combined purging of a converter bath. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):100–109. (In Russ.).
<http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-100-109>
 9. Stel van der J. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40:483–487.
 10. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
 11. Protopopov E.V., Lavrik D.A., Chernyatevich A.G. Improving the efficiency of exhaust gas afterburning in liquid-phase reduction converters. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2001;6:13–17. (In Russ.).
 12. Yaroshenko A.V., Sukhanov Yu.F., Dolgikh Yu.N. Optimization of combined purging in a converter using new technical support. *Stal'*. 2008;8:19–21. (In Russ.).
 13. Babenko A.A., Chelpan S.M., Kokarenko O.N. Crushing of oxygen purge tuyeres during steel smelting from carbonaceous intermediates. *Chernaya metallurgiya*. 2005;6:33–35. (In Russ.).
 14. 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(1-4):19–32.
<https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
 15. Stone R.P., Neith D., Koester S. et al. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceedings*. 2009;1:737–747.
 16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
 17. 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.
 18. Cao L.L., Liu Q., Wang Z., Li N. Interaction behavior between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018;45(3):239–248.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1255373>
 19. 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>
 20. Yugov P.I. The current state of the world practice of converter production and scientific directions of its development in Russia. *Chernaya metallurgiya*. 2001;9:9–13. (In Russ.).
 21. Ughadpada K., Briglio S., Mohammed G. Production improvement of No. 2 BOSP at ESAI. *Iron and Steel Technology*. 2010;11:59–64.
 22. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Filipenko S.A., Feiler S.V. Prospective design of an oxygen form for converters of EVRAZ ZSMK capacity of 350 t. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2013;(2):4–7. (In Russ.).
 23. Stone R.P., Neith D., Koester S. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceeding*. 2009;1:737–747.
 24. 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(3):466.
<https://doi.org/10.3390/met12030466>
 25. Samokhvalov S.E., Sokol A.N. Quasi-three-dimensional mathematical model of hydrodynamic processes in the converter cavity. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2008;2(19):67–70. (In Russ.).
 26. Sokol A.N. Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the converter cavity during

upper purging in a three-dimensional formulation. *Vestnik Khersonskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;3(39):448–454. (In Russ.).

27. Samokhvalov S.E., Sokol A.M. *Mathematical modeling of mixing processes in a converter*. Dneprodzerzhinsk: izd. DDTU, 2013:99. (In Russ.).
28. Chen J.D., Zhang C.J., Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.

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

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

E-mail: pimm@sibsiu.ru

Екатерина Михайловна Запольская, к.т.н., с.н.с. лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors:

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

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

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

E-mail: pimm@sibsiu.ru

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 03.03.2026

После доработки 15.04.2026

Принята к публикации 23.04.2026

Received 03.03.2026

Revised 15.04.2026

Accepted 23.04.2026