

Оригинальная статья

УДК 669.184.244.66

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-87-93

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИСЛОРОДНЫХ СТРУЙ С РАСПЛАВОМ ПРИ ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

© 2023 г. **Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, И. С. Морозов, М. К. Шакиров**

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

Аннотация. С использованием математического моделирования выполнен комплексный анализ экспериментальных данных по исследованию особенностей поведения 350-т конвертерной ванны в характерные периоды верхней продувки при высокой скорости обезуглероживания расплава и на заключительном этапе операции. Разработанные и адаптированные математические модели и проведенные численные исследования позволили дополнительно описать макрофизические явления при движении газометаллической, газошлаковой и многокомпонентных фаз в рабочем пространстве конвертера. Установлено, что общая динамика и циркуляция газослакометаллической среды в целом определяется процессами в реакционной зоне и уровнем вспененного шлака. При продувке расплава через верхнюю фурму в режиме заглубленных газовых струй и различном количестве шлака в рабочем пространстве определены количественные характеристики относительных величин газосодержания в шлаке по отношению к средней плотности и концентрации газа в эмульсии. Полученные данные позволяют дополнить представления о гидродинамике металлической и шлаковой фаз в конвертере в характерные периоды плавки и использовать полученную информацию при разработке рациональных параметров дутьевого режима конвертерной операции.

Ключевые слова: конвертер, верхняя кислородная продувка, режим взаимодействия, гидрогазодинамика конвертерной ванны, математическая модель

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов И.С., Шакиров М.К. Математическая модель режимов взаимодействия кислородных струй с расплавом при верхней продувке конвертерной ванны // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 87 – 93. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-87-93](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-87-93)

Original article

MATHEMATICAL MODEL OF THE MODES OF INTERACTION OF OXYGEN JETS WITH THE MELT DURING UPPER PURGING CONVERTER BATH

© 2023 **E. V. Protopopov, A. A. Umanskii, I. S. Morozov, M. K. Shakirov**

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

Abstract. Using mathematical modeling, a comprehensive analysis of experimental data on the study of the behavior of a 350-ton converter bath during characteristic periods of upper purging at a high rate of decarburization of the melt and at the final stage of the operation was performed. The developed and adapted mathematical models and numerical studies made it possible to additionally describe macrophysical phenomena during the movement of gas-metallic, gas-slag and multicomponent phases in the working space of the converter. It is established that the overall dynamics and circulation of the gas-and-metal medium as a whole is determined by the processes in the reaction zone and the level of foamed slag. When the melt is purged through the upper lance in the mode of buried gas jets and a different amount of slag in the working space, quantitative characteristics of the relative values of the gas content in the slag in relation to the average density and concentration of gas in the emulsion are determined. The obtained data allow us to supplement the

understanding of the hydrodynamics of the metal and slag phases in the converter during the characteristic periods of melting and use the information obtained in the development of rational parameters of the blast mode of the converter operation.

Keywords: converter, upper oxygen purge, interaction mode, hydro-gas dynamics of the converter bath, mathematical model

For citation: Protopopov E.V., Umanskii A.A., Morozov I. S., Shakirov M.K. Mathematical model of the modes of interaction of oxygen jets with the melt during upper purging converter bath. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 87 – 93. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-87-93](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-87-93)

Введение

Происходящие в конвертерной ванне процессы связаны, прежде всего, с гидродинамическими и теплообменными явлениями в высокотемпературных средах. Эти процессы практически не поддаются непосредственному изучению или их исследование требует неоправданно высоких затрат средств и времени. Вместе с тем при использовании высокотемпературного и математического моделирования может быть получен значительный объем информации, а результаты моделирования могут послужить основой для новых технологических и конструктивных решений.

Накопленный экспериментальный материал по вопросам взаимодействия кислородных струй с расплавом [1 – 5], структуры реакционных зон и механизма рафинирования [6 – 9], поведения конвертерной ванны при продувке [10 – 14] при объединении и анализе позволяет сформировать основные положения физико-химической модели конвертерного процесса [2, 15] и на ее основе вплотную подойти к технически грамотному решению практических задач.

Реализация такого подхода при разработке параметров рационального дутьевого режима конвертерной операции может быть осуществлена при формировании основных положений разработанных математических моделей для исследования характерных периодов плавки.

Методы и принципы исследования

С учетом поставленных задач с использованием разработанной и усовершенствованной математической модели выполнены численные исследования особенностей газовыделения в 350-т конвертерной ванне при верхней продувке [16 – 18]. При постановке задачи для исследования выделены наиболее значимые периоды продувки ванны, в том числе этап активного обезуглероживания и заключительный этап операции продувки. В качестве допущений при расчетах приняты постоянные размеры образующейся реакционной зоны, масса расплава и уровень ванны в период продувки при рабочих параметрах дутья с учетом преимущественного расхода кислорода (примерно до

95 % от общего за плавку) в пределах реакционной зоны на обезуглероживание. Принято, что преимущественно реакция протекает на границе раздела струи кислорода с металлом. Задача решена в осесимметричной постановке в предположении, что граница раздела газометаллической и газошлаковой фаз фиксирована, определяется уровнем металла в конвертере и параболическим законом при описании формы реакционной зоны.

Определяющие глубину внедрения газовой струи в расплав и диаметр реакционной зоны параметры задавали исходя из эмпирических закономерностей.

Поскольку в разработанной модели исследуемые газометаллическая и газошлаковая фазы являются газожидкостными средами, последние могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} &= - \left(\vec{V}_p \vec{\nabla} \right) \vec{V}_p + v_e \Delta \vec{V}_p + \\ &+ \zeta_e \vec{\nabla} (\vec{V}_p - \vec{V}) + (1 - \alpha) \vec{g} - \vec{\rho}; \\ \vec{\nabla} \vec{V}_p &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} &= - \vec{V}(\alpha \vec{V}_p) + \Phi(\vec{V}_p, \alpha), \end{aligned} \right\}$$

в которой \vec{V}_p – барицентрическая скорость среды; v_e и ζ_e – кинематическая и динамическая вязкость; α – коэффициент объемного газосодержания; $\vec{\rho}$ – динамическая составляющая давления, отнесенная к плотности несущей жидкой фазы (металла и шлака).

В этом случае эффективный источник газовой фазы в газожидкостной среде можно представить выражением

$$\Phi(\vec{V}_p, \alpha) = \psi - \alpha \xi \rho \vec{g} (\vec{V}_p + \vec{W}_p) - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W}_g),$$

полученным в пренебрежении динамической составляющей давления по сравнению с гидростатической, что возможно для режимов течения, реализуемых при продувке конвертерной ванны (здесь ψ и ξ – объемный источник газовой фазы и логарифмическая производная плотности этой фазы по давлению). Входящая в это выражение

диффузионная скорость (\vec{W}_g) газовой фазы имеет конвективную (\vec{W}_g^c) и турбулентную (\vec{W}_g^t) составляющие. Конвективная составляющая в вакуумном приближении имеет постоянное направление, определяемое ускорением свободного падения, а величина ее задана непосредственно исходя из экспериментальных данных. Турбулентная составляющая определяется через эффективный коэффициент турбулентной диффузии газовой фазы (D_g) соотношением

$$\alpha \vec{W}_g^t = -D_g \vec{\nabla}.$$

Обсуждение результатов

Расчеты проведены для условий плавки в 350-т конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с параметрами дутьевого режима, разработанного в соответствии с ТИ 899-ККЦ-2-01-2019. Геометрические параметры конвертеров: высота рабочего пространства 9,76 м; диаметр нижней части 6,4 м; диаметр горловины 3,46 м; высота конической части горловины 2,57 м; уровень металла в конвертере 1,5 м, при рабочем положении фурмы 1,2 м от поверхности металла; расход кислорода на продувку составляет 900 – 1200 м³/мин; использование 4-х сопловой фурмы; диаметр сопла 0,054 м; угол наклона сопел составляет 15° к оси симметрии агрегата; глубина реакционной зоны 0,9 м. Граничные условия определяли в соответствии с решаемыми задачами.

Результаты расчета, полученные для двух характерных значений уровня шлака в конвертере 1,5 и 3,0 м, приведены на рис. 1 (стрелки указывают направления скоростей, кривые – линии изоконцентрации газовой фазы с коэффициентом объемного газосодержания, изменяющимся в пределах от 0,05 до 0,20).

Как показывает анализ (рис. 1), на качественном уровне фиксируется значительное влияние динамики газшлаковой фазы, которая существенно зависит от ее уровня и количества в объеме конвертера, при этом аналогичное влияние на динамику газометаллической фазы незначительно. В связи с отмеченными особенностями в дальнейшем выполнили отдельный ана-

лиз полученных результатов для условий газометаллической и газшлаковой фаз.

Расплав (рис. 1) движется в замкнутом глобальном вихре, при этом восходящие потоки фиксируются вдоль поверхности реакционной зоны и границы раздела с газшлаковой фазой, затем потоки всплывающими пузырями оттесняются к стенкам конвертера, опускаются вдоль стенок к днищу конвертера и в дальнейшем возвращаются по поверхности к реакционной зоне.

Таким образом формируются замкнутые контуры циркуляции, которые определяют общую скорость движения ванны и теплообмен. В области симметрии агрегата образуется вихрь, вращающийся в противоположном направлении. У днища конвертера, под реакционной зоной, потоки расплава, входящие в эти два вихря, сталкиваются, очевидно, перемешиваются и направляются вверх, образуя границу раздела вихрей. На участке реакционной зоны расплав имеет значительное количество газовых включений, что обусловлено совместными действиями газовой струи и всплывающих пузырей оксида углерода СО.

Общая динамика газшлаковой фазы, очевидно, будет определяться уровнем вспененного шлака. Важным фактором здесь является доказательство существования интенсивного потока газшлаковых объемов от границы реакционной зоны к поверхности шлака, обусловленного движением газа, который выделяется в реакционной зоне. Газ при движении увлекает всплы-

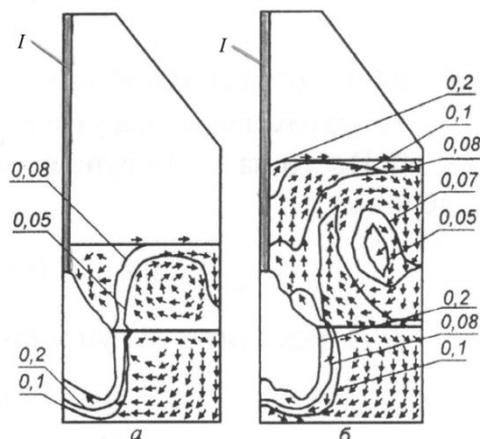


Рис. 1. Гидродинамика металлической и шлаковой фаз в рабочем пространстве конвертера при продувке через фурму (I) в режиме «заглубленных» струй при уровне шлака в конвертере 1,5 м (а) и 3,0 м (б) (стрелки – направление скоростей; кривые – линии изоконцентрации газовой фазы; цифры – коэффициенты объемного газосодержания)
Fig. 1. Hydrodynamics of metal and slag phases in the working space of the converter when blowing through the tuyere (I) in the mode of "buried" jets at the slag level in the converter of 1.5 m (a) and 3.0 m (b) (arrows – velocity direction; curves – lines of gas phase isoconcentrations; figures – coefficients of volumetric gas content)

вающий шлак, который у свободной поверхности частично освобождается от газовых включений, разделяясь на два потока. Первый, двигаясь к стенкам конвертера, а затем вдоль них вниз, образует основной интенсивный тороидальный вихрь, вращающийся в плоскости рисунка по часовой стрелке. Второй поток движется к кислородной фурме и образует в верхних горизонтах ванны области вихря, вращающегося в противоположном направлении. При этом с повышением уровня шлака центр основного вихря смещается вверх (рис. 1, б).

Распределение газовых включений также существенно зависит от уровня шлака в конвертере. При относительно небольшом количестве вспененного шлака (рис. 1, а) значительное количество газа, образующегося в объеме реакционной зоны, достигает свободной поверхности и покидает зону шлаковой фазы и лишь незначительная его доля затягивается обратно в шлак у стенок конвертера нисходящими потоками. С увеличением общего уровня вспененного шлака (рис. 1, б) количество газа, не успевающего покинуть шлак, постепенно увеличивается. Всплывающий газ вовлекается в глобальный общий вихрь, в результате чего его концентрация в центре вихря возрастает, что приводит к прорывам оболочки газошлакометаллической эмульсии и выходу газовых объемов на поверхность ванны.

Численным моделированием определены количественные характеристики относительных величин газосодержания в шлаке, то есть объемная концентрация газа рассчитана по отношению к средней плотности газошлаковой эмульсии. При этом заметное содержание газа в металле наблюдается только в области, примыкающей к реакционной зоне, где значение α превышает 0,2. В шлаке газовые объемы относительно равномерно распределены по высоте вблизи стенок конвертера, где значение α не более 0,1. В центре зоны вихря газосодержание превышает величину 0,25.

Наиболее интенсивный выход газа со свободной поверхности шлака для исследованных уровней приходится на участок, соответствующий границе реакционной зоны. При этом в случае незначительного уровня вспененного шлака такой максимум наиболее выражен. С повышением уровня шлака высота такого пика уменьшается и он «растягивается» в сечении ванны в направлении к стенкам конвертера.

Описанная модель позволила исследовать общий характер движения циркуляционных потоков и характерное распределение зоны всплывания газовых пузырей в металлической и шлаковой фазах, однако без учета возможности существования на поверхности расплава участков

интенсивного «свищевого» выхода газа на поверхность шлака с коэффициентом газосодержания, близким к единице. Такой подход связан с принципиальным допущением в модели, что значение коэффициента газосодержания незначительно.

С целью численного исследования влияния этих зон на протекание газодинамических процессов в полости конвертера разработали математическую модель, которая учитывает существование в рабочем объеме агрегата зон со значительно большим газосодержанием, расположение которых определялось с использованием ранее полученных экспериментальных данных [5, 10, 12]. Наличие таких зон способствует повышенному газосодержанию ванны на заключительном этапе продувки при незначительной скорости обезуглероживания и, соответственно, способствует повышенной окисленности металла. Такие зоны явно выделялись и не включались в расчетную область.

Задачу решали в цилиндрически симметричной постановке, что обусловлено расположением верхней фурмы по оси симметрии конвертера. Как и ранее [17], предполагали, что граница раздела газометаллической и газошлаковой зон фиксирована и определяется уровнем металла в конвертере и формой реакционной зоны.

Границы зоны со значительным газосодержанием определяли по параболическому закону $y = ax^2 + bx + c$, где коэффициенты a, b, c находили при решении соответствующих линейных алгебраических уравнений. В частности, для параболы, описывающей правую границу зоны, коэффициенты выбирались в соответствии со следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{(H_{\text{шл}} - c)}{\beta^2}; \\ b &= \frac{2(H_{\text{шл}} - c)}{\beta}; \\ c &= \frac{H_M + H_{\text{шл}} [(R_{\text{р.з}} - 1,5) / (\beta - 2)] / \beta}{[(R_{\text{р.з}} - 1,5 / \beta^2)] - 2(R_{\text{р.з}} - 1,5) / (\beta + 1)}, \end{aligned} \right\}$$

а для параболы, описывающей левую границу, выражениями:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\lambda / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \\ b &= 2\lambda / (H_M + \delta) / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \\ c &= 5\beta - \lambda (H_M + \delta)^2 / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \end{aligned} \right\}$$

здесь $H_{\text{шл}}$ и $H_{\text{м}}$ – высота слоев шлака и металла; β и δ – масштабные коэффициенты по радиусу и высоте; $R_{\text{р.з}}$ – радиус реакционной зоны; λ – расстояние от оси симметрии конвертера до правой границы зоны на поверхности шлака.

В этом случае динамику газожидкостной среды можно описывать следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} &= - \left(\vec{V}_p \vec{\nabla} \right) \vec{V}_p + v_e \vec{\Delta} \vec{\nabla} + (1-\alpha) \vec{g} - \vec{\nabla} \vec{p}; \\ \vec{\nabla} \vec{V}_p &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha \vec{V}_p) &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \Phi(\vec{V}_p, \alpha) &= \psi - \alpha \xi \rho \vec{g} (\vec{V}_p + \vec{W}_g) - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W}_g), \end{aligned} \right\}$$

где $\vec{\Delta}$ – оператор Лапласа; $\xi = 1/\gamma\rho$.

В прифурменной области действует источник газовой фазы $\psi = qO_2T/(273Q)$, где qO_2 – минутный расход кислорода через фурму; Q – характерный расход газа; T – температура металла.

При выполнении моделирования численные решения выполняли методом расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения среды в двумерном случае в цилиндрической системе координат. Граничные условия задавали, выполняя следующие условия: для барицентрической скорости среды газ – расплав на твердых поверхностях, свободной поверхности и оси симметрии – условия свободного скольжения; для коэффициента объемного содержания на твердых поверхностях и оси симметрии – условия не протекания, а на свободной поверхности и оси симметрии – свободного протекания. В зоне с большим газосодержанием граничные условия определяются с учетом условий баланса. Таким образом, для ячейки с номером (i, n) справедливы соотношения $a_{i,n} = \alpha_{\text{общ}}/N$ и $w_{i,n} = Q/S_n$ (здесь $\alpha_{\text{общ}}$ – общее количество газа на n -м слое; N – количество ячеек, приходящихся на зону с большим газосодержанием на n -м слое; Q – характерный расход газа; S_n – площадь n -го слоя).

В численных расчетах варьировали общее количество газа на n -м слое, накапливающегося для формирования зоны с большим газосодержанием. Результаты тестовых расчетов, иллюстрирующих характер движения среды в объеме конвертера для двух различных значений $\alpha_{\text{общ}}$, представлены на рис. 2.

Расплав в конвертере (рис. 2, а) движется в едином глобальном вихре. В объеме ванны металл под действием газовых потоков в реакционной зоне формируется в вихревой поток, движущийся по часовой стрелке. В случае, показанном на рис. 2, б, в области стенок агрегата на границе раздела металлической и шлаковой фаз формируется малый нестационарный вихрь, движущийся против часовой стрелки, что, по видимому, обусловлено большими значениями скоростей около данной границы. При этом под реакционной зоной в обоих случаях наблюдается формирование дополнительного вихря, движущегося также по часовой стрелке.

Общим в рассмотренных случаях является существование интенсивного потока всплывающих газшлаковых объемов от реакционной зоны к поверхности шлака, что обусловлено движением газа при выделении из реакционной зоны и направленного в зону с большим газосодержанием. При таком движении газ захватывает и шлак, который у свободной поверхности создает дополнительный вихрь, движущийся по часовой стрелке.

Значительное газосодержание в металле наблюдается только в области, примыкающей к реакционной зоне. При подъеме к поверхности концентрация газа уменьшается, а ее относительный объем растет. В шлаке газ относительно равномерно распределяется по высоте около границы выделенной зоны с большим газосодержанием как с правой, так и с левой стороны. Насыщение газом и формирование газшлаковой среды происходит практически на всем пути движения потока к свободной поверхности, при этом

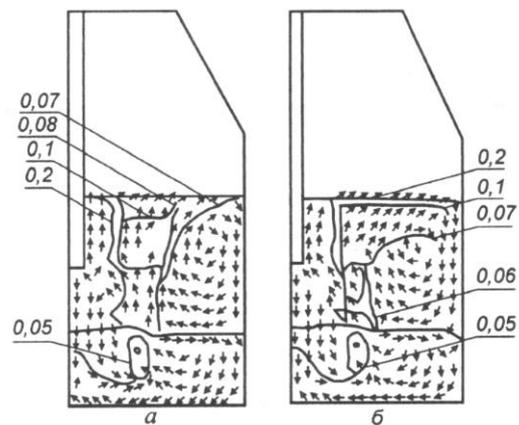


Рис. 2. Динамика металлической и шлаковой фаз для двух разных значений $\alpha_{\text{общ}}$ и изолинии концентраций газовой фазы в полости конвертера (стрелки – направление скоростей; кривые – линии изоконцентраций газовой фазы; цифры – коэффициенты объемного газосодержания)

Fig. 2. Dynamics of metal and slag phases for two different values of the total and isolines of gas phase concentrations in the cavity of the converter (arrows – direction of velocities; curves – lines of gas phase isoconcentrations; figures – coefficients of volumetric gas content)

незначительная часть газа будет втягиваться в глобальный вихрь. При увеличении значения $\alpha_{\text{общ}}$ газ интенсивнее захватывается глобальным вихрем и распределяется вдоль стенок конвертера, накапливаясь и формируя на этих участках застойные зоны. Тем не менее наибольшая концентрация газовой фазы все равно наблюдается в пределах реакционной зоны.

Выводы

Полученная численными исследованиями макрофизическая картина качественно согласуется с результатами «горячего» моделирования движения газшлакометаллической среды в рабочем пространстве конвертера. Разработанные математические модели и проведенные численные эксперименты позволили дополнить сведения о характере движения газометаллической и газшлаковой сред, механизме накопления газа в объеме 350-т конвертера и выходе продуктов реакции на поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. Москва: Металлургия, 1987. 256 с.
- Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. Киев-Донецк: Вища школа, 1981. 183 с.
- Охотский В.Б. Строение газовых струй // Известия вузов. Черная металлургия. 1983. № 11. С. 32–35.
- Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. Москва: Металлургия, 1974. 495 с.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй сходящими конвертерными газами // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5–9.
- Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирина К.С. О механизме процесса выгорания углерода при продувке металла кислородом. В кн.: Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. научн.-техн. сб. № 52. Киев: Техника. 1977. С. 71–72.
- Охотский В.Б., Баптизманский В.И., Просвирина К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом // Известия вузов. Черная металлургия. 1973. № 8. С. 50–53.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. № 10. С. 20–24.
- Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в целях комбинированной продувки // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 17–24.
- Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н., Волович М.И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой // Известия вузов. Черная металлургия. 1976. № 10. С. 54–59.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 23–29.
- Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 11–17.
- Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке // Известия вузов. Черная металлургия. 1987. № 4. С. 25–29.
- Охотский В.Б. Взаимодействие газовой струи с жидкостью при продувке сверху // Известия вузов. Черная металлургия. 1984. № 1. С. 45–49.
- Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. Москва: Металлургия, 1993. 151 с.
- Чернятевич А.Г., Сигарев Е.М., Зуев О.И. // Математичне моделювання. 2002. № 1 (8). С. 77–80.
- Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Селищев В.Н. // Математичне моделювання. 2001. № 1 (6). С. 93–96.
- Сигарев Е.Н., Косухина О.С., Попко О.В. // Математичне моделювання. 2003. № 1 (9). С. 50–53.

REFERENCES

- Sizov A.M. *Gas dynamics and heat exchange of gas jets in metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 256 p. (In Russ.).
- Okhotskii V.B. Structure of gas jets. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1983, no. 11, pp. 32–35. (In Russ.).
- Baptizmanskii V.I., Okhotskii V.B. *Physico-chemical bases of the oxygen converter process*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981, 183 p. (In Russ.).
- Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *The theory of purging a steelmaking bath*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 495 p. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernetevich A.G. Investigation of the interaction of oxygen jets with

- waste converter gases. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1996, no.10, pp. 5–9. (In Russ.).
6. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. *On the mechanism of the carbon burnout process when metal is purged with oxygen*. In: *Metallurgy and Coke Chemistry: Rep. mezhd. sci.-tech. sat.* Kyiv: Tekhnika, 1977, no. 52, pp. 71–72. (In Russ.).
 7. Okhotskii V.B., Baptizanskii V.I., Prosvirin K.S., Shchdrin G.A. The structure of the reaction zone during metal purging with oxygen. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1973, no. 8, pp. 50–53. (In Russ.).
 8. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gradients in a converter bath using high-temperature modeling. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1997, no. 10, pp. 20–24. (In Russ.).
 9. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of a converter bath for the purpose of combined purging. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 17–24. (In Russ.).
 10. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. On the mechanism of emission formation from an oxygen converter with an upper purge. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1976, no. 10, pp. 54–59. (In Russ.).
 11. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic features of the behavior of the converter bath with various methods of purging. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 23–29. (In Russ.).
 12. Mokrinisky A.V., Protopopov E. V., Chernyatevich A.G. Hydrodynamic modes of interaction of acidic jets with a converter bath. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2005, no. 4, pp. 11 – 17. (In Russ.).
 13. Chernyatevich A.G., Protopopov E. V., Ganzer L.A. On some peculiarities of the oxidation of impurities in a converter bath during combined purging: Investigation of the interaction of acidic jets with outgoing gases. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1987, no. 4, pp. 25–29. (In Russ.).
 14. Okhotskii V.B. Interaction of a gas jet with a liquid when purging from above. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1984, no. 1, pp. 45–49. Нет названия (In Russ.).
 15. Okhotskii V.B. *Physico-chemical mechanics of steelmaking processes*. Moscow: Metallurgiya, 1993, 151 p. (In Russ.).
 16. Chernyatevich A. G., Sigarev E. M., Zuev O. I. *Matematichne modelyuvannya*. 2002, no. 1 (8), pp. 77–80. (In Russ.).
 17. Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Selishchev V.N. *Matematichne modelyuvannya*. 2001, no. 1 (6), pp. 93–96. (In Russ.).
 18. Sigarev E. N., Kosukhina O. S., Popko O. V. *Matematichne modelyuvannya*. 2003, no. 1 (9), pp. 50–53. (In Russ.).
- Сведения об авторах**
Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
- Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
- Иван Сергеевич Морозов**, соискатель кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ismorozov23@mail.ru
- Максим Кимович Шакиров**, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sakirov.maxim@mail.ru
ORCID: 0009-0007-4938-5975
- Information about the authors**
Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
- Aleksandr A. Umanskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
- Ivan S. Morozov**, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: ismorozov23@mail.ru
- Maksim K. Shakirov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Information Systems, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sakirov.maxim@mail.ru
ORCID: 0009-0007-4938-5975

Поступила в редакцию 01.09.2023

После доработки 15.09.2023

Принята к публикации 16.09.2023

Received 01.09.2023

Revised 15.09.2023

Accepted 16.09.2023