

Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61:66-971

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-103-111

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ
ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ. СООБЩЕНИЕ 3**

© 2025 г. Е. В. Протопопов, С. С. Фатьянов, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Високотемпературные экспериментальные исследования, выполненные с использованием двухкамерных моделей кислородных конвертеров, посвящены анализу и изучению процессов в конвертерной ванне при различных режимах комбинированной продувки с подачей через днище перемешивающего нейтрального газа. При обработке экспериментальных данных установлены значения изменения переходных и критических концентраций углерода в расплаве в зависимости от условий и особенностей режима продувки, высоты расположения кислородной фурмы и схемы размещения сопел в днище. Донная продувка нейтральным газом с расходом $0,05 - 0,20 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$ при улучшении перемешивания ванны способствует снижению переходных концентраций углерода в интервале с $0,9 - 1,2 \%$ для условий верхней продувки до $0,4 - 0,5 \%$ при комбинированной продувке, начиная с которых неиспользованный на окисление примесей в реакционной зоне кислород начинает интенсивно поступать в объем расплава. На основании полученных экспериментальных данных для определения коэффициентов массопереноса в расплаве выполнена оценка эффективных коэффициентов диффузии углерода для различных условий и периодов плавки в зависимости от установившихся параметров циркуляции расплава и характерных размеров сталеплавильной ванны с использованием принятых допущений и использования аналитических моделей, полученных при анализе формы реакционной зоны и особенностей взаимодействия газовых струй с расплавом. Получены формулы и выполнены расчеты характеристик массообменных процессов в конвертерной ванне после снижения концентрации углерода ниже переходных значений, определенных экспериментально. Получены значения эффективных коэффициентов диффузии для лабораторных конвертеров, которые составляют $20 - 270 \text{ см}^2/\text{с}$ с пересчетом на характеристики промышленных конвертеров емкостью 160 т, которые составляют $800 - 2700 \text{ см}^2/\text{с}$. Полученная информация может быть использована для оптимизации конструкций агрегатов и технологии комбинированной продувки.

Ключевые слова: конвертер, високотемпературное моделирование, обезуглероживание, массоперенос, эффективный коэффициент диффузии

Для цитирования: Протопопов Е.В., Фатьянов С.С., Запольская Е.М. Определение характеристик тепло-массопереноса в процессе обезуглероживания конвертерной ванны. Сообщение 3. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;4(54):103–111. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-103-111](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-103-111)

Original article

**DETERMINATION OF HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS IN THE
PROCESS OF DECARBONIZATION OF THE CONVERTER BATHS. MESSAGE 3**

© 2025 E. V. Protopopov, S. S. Fat'yanov, E. M. Zapol'skaya

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

Abstract. High-temperature experimental studies performed using two-chamber models of oxygen converters are devoted to the analysis and study of processes in a converter bath under various modes of combined purging with the supply of mixing neutral gas through the bottom. During the processing of experimental data, the values

of changes in the transient and critical carbon concentrations in the melt were determined depending on the conditions and especially the purge mode, the height of the oxygen tuyere and the layout of the nozzles in the bottom. Bottom purging with neutral gas with a flow rate of $0.05 - 0.20 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$, while improving the mixing of the bath, reduces the transient carbon concentrations in the range from $0.9 - 1.2 \%$ for upper purging conditions to $0.4 - 0.5 \%$ for combined purging, starting from which oxygen unused for the oxidation of impurities in the reaction zone begins to intensively calculate the volume of the melt. Based on the experimental data obtained to determine the mass transfer coefficients in the melt, the effective carbon diffusion coefficients for various melting conditions and periods were estimated depending on the steady-state melt circulation parameters and the characteristic dimensions of the steelmaking bath using accepted assumptions and using analytical models obtained by analyzing the shape of the reaction zone and the interaction of gas jets with the melt. Calculation formulas have been obtained and calculations of the characteristics of mass transfer processes in a conversion bath have been performed after reducing the carbon concentration below the transition values determined experimentally. The values of effective diffusion coefficients for laboratory converters have been obtained, which are $20 - 270 \text{ cm}^2/\text{s}$, based on the characteristics of industrial converters with a capacity of 160 tons, which are $800 - 2700 \text{ cm}^2/\text{s}$. The information obtained can be used to optimize the designs of aggregates and the technology of combined purging.

Keywords: converter, high temperature modeling, decarbonization, mass transfer, effective diffusion coefficient

For citation: Protopopov E.V., Fat'yanov S.S., Zapol'skaya E.M. Determination of heat and mass transfer characteristics during converter bath decarburization. Message 3. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;4(54):103–111. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-103-111](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-103-111)

Введение

Выполненные с использованием высокотемпературного моделирования исследования [1; 2] позволили получить новые экспериментальные данные, которые с достаточной точностью описывают особенности механизма процессов в конвертерной ванне в условиях верхней или комбинированной продувки расплава при подаче через днище нейтрального газа [3 – 5].

При обработке полученных данных удалось установить влияние зависимости параметров дутья и изменения значений переходных ($C_{\text{пер}}$) и критических ($C_{\text{кр}}$) концентраций углерода, которые были определены химическим анализом проб металла, отобранных из сравнительной камеры в момент появления над ней факела (L_c) догорающего монооксида углерода ($C_{\text{пер}}$) и начала резкого падения факелов (L_c , L_p) в завершающей стадии операции ($C_{\text{кр}}$). В условиях верхней и комбинированной продувки (рис. 1) происходит монотонное увеличение значений переходной и критической концентрации углерода с повышением удельной интенсивности верхнего и донного дутья ($G_{\text{O}_2}^B$, $G_{\text{N}_2}^D$).

Получены следующие зависимости изменения $C_{\text{пер}}$ и $C_{\text{кр}}$ для условий верхней (в) и комбинированной (к) продувки:

$$C_{\text{пер}}^B = 1,319 - \frac{0,642}{G_{\text{O}_2}^B}; R = 0,860; \quad (1)$$

$$C_{\text{кр}}^B = \frac{1}{3,547(G_{\text{O}_2}^B)^2 - 23,268G_{\text{O}_2}^B + 41,557}; R = 0,822 \quad (2)$$

$$C_{\text{пер}}^{\text{комб}} = 0,030(G_{\text{O}_2}^B + G_{\text{N}_2}^D)^2 + 0,089(G_{\text{O}_2}^B + G_{\text{N}_2}^D) + 0,032; R = 0,846; \quad (3)$$

$$C_{\text{кр}}^{\text{комб}} = 0,314(G_{\text{O}_2}^B + G_{\text{N}_2}^D)^2 - 2,658(G_{\text{O}_2}^B + G_{\text{N}_2}^D) + 5,739; R = 0,89. \quad (4)$$

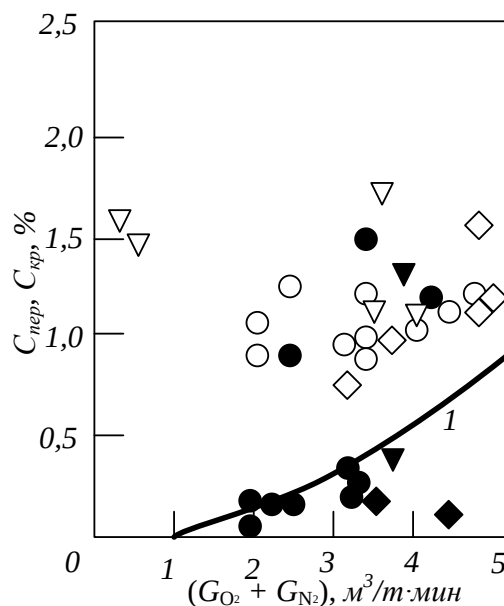


Рис. 1. Изменение величин $C_{\text{пер}}$ ($\diamond$, $\square$, Δ) и $C_{\text{кр}}$ ($\blacklozenge$, $\blacksquare$, $\blacktriangle$) в зависимости от условий продувки:

1 – верхняя кислородная продувка (обобщенная зависимость $C_{\text{кр}}$ от J_{O_2} [3]); 2 – 4 – комбинированная продувка кислородом и нейтральным газом с интенсивностью подачи G_{N_2} 0,05 – 0,10 ($\diamond$, $\blacklozenge$); 0,10 – 0,15 ($\square$, $\blacksquare$) и 0,15 – 0,20 (Δ , $\blacktriangle$) $\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$

Fig. 1. Change in the values of C_{pr} ($\diamond$, $\square$, Δ) and C_{fr} ($\blacklozenge$, $\blacksquare$, $\blacktriangle$) depending on the purge conditions:

1 – upper oxygen purge (generalized dependence of C_{fr} on J_{O_2} [3]); 2 – 4 – combined purging with oxygen and neutral gas with supply intensity G_{N_2} 0.05 – 0.10 ($\diamond$, $\blacklozenge$); 0.10 – 0.15 ($\square$, $\blacksquare$) and 0.15 – 0.20 (Δ , $\blacktriangle$) $\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$

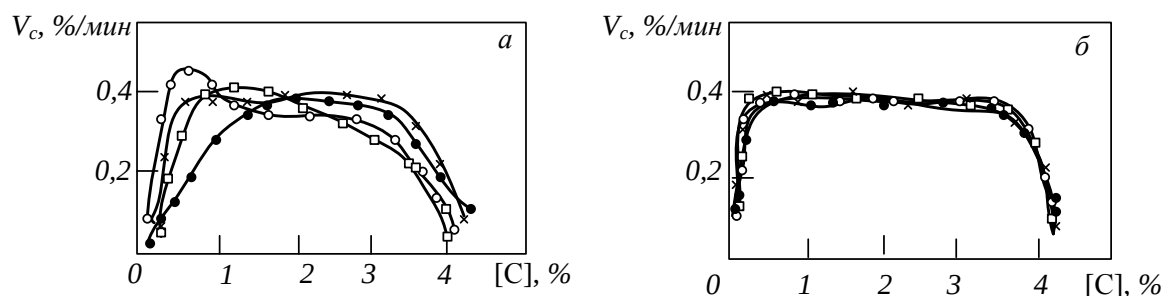


Рис. 2. Взаимосвязь между концентрацией и скоростью окисления углерода в конвертере емкостью 60 кг при верхней (а) и комбинированной (б) продувке; расход кислорода сверху через 4-сопловую фурму $3,5 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$ при $H_{\text{ф}}^{\text{раб}} = 30$ калибров; расход азота через днище через три сопла $0,1 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$

Fig. 2. The relationship between the concentration and rate of carbon oxidation in a 60 kg converter with top (a) and combined (b) purging; oxygen consumption from above through a 4-nozzle tuyere of $3.5 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$, at $H_{\text{ф}}^{\text{раб}} = 30$ calibers; nitrogen consumption through the bottom through three nozzles $0.1 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$

С учетом предположения, что переходная концентрация углерода в металле при продувке зависит от условий массопереноса последнего в реакционную зону направленными потоками расплава из отдаленных участков ванны, то при стехиометрическом соотношении интенсивностей подачи кислорода (I_{O_2}) и углерода (I_{C}) в зону взаимодействия на основе преобразования известного уравнения $I_{\text{C}} = (D_t/l)\Delta C F$, где D_t – коэффициент турбулентной диффузии; l – длина при массопереносе; F – площадь участка, через которую осуществляется массоперенос; ΔC – разность концентрации. Тогда в целом можно получить обобщенное выражение с использованием параметров, характеризующих взаимодействие газовой струи с металлом.

$$C_{\text{пер}}, \% = K_C \frac{D_{\text{общ}}^B L_{\text{IImax}} (G_{\text{O}_2} + G_{\text{N}_2})}{(n^B + n^L)(D_{\text{IImax}}^2 - D_{\text{Imax}}^2) W_M^{\text{р.з.}}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{общ}}^B$ – общий диаметр объединенной реакционной зоны при верхней кислородной продувке, м; L_{IImax} и D_{IImax} – максимальная длина и диаметр вторичной реакционной зоны для одиночной верхней или донной газовой струи, м; D_{Imax} – максимальный диаметр первичной реакционной зоны для одиночной струи, м; G_{O_2} и G_{N_2} – удельная интенсивность продувки металла кислородом и нейтральным газом, $\text{м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$; $W_M^{\text{р.з.}}$ – скорость потоков расплава во вторичной реакционной зоне, м/с; n^B и n^L – число сопел в головке верхней фурмы и донных сопел в днище агрегата, шт.; K_C – коэффициент, равный 0,846 и 0,815, для верхней и комбинированной продувки.

Тогда численные значения параметров реакционных зон и скоростей потоков расплава, входящих в полученное уравнение при заданных условиях продувки, можно определить в соответствии с известными выражениями [6].

Анализ полученных экспериментальных данных и выражений с ранее известными сведениями показывает некоторое несоответствие значений $C_{\text{пер}}$, полученных для модельных конвертеров. Применение полученных в работах [6; 7] зависимостей позволяет при определенном дутьевом режиме плавки легко определить значение $C_{\text{пер}}$ и тем самым установить расход дополнительного кислорода для обеспечения дожигания отходящих газов в полости конвертера в рассматриваемый период операции. Установлено, что при уменьшении концентрации в металле углерода ниже переходных значений $[C]_{\text{пер}}, \%$, могут создаваться различные условия для дальнейшего обезуглероживания ванны. При одной и той же интенсивности верхней продувки [8] может быть реализован различный ход и характер кривых обезуглероживания (рис. 2).

Например, на некоторых плавках при одинаковой высоте фурмы, начиная с достаточно высоких значений концентрации углерода в расплаве ($[C] = 1,2 - 1,5 \%$), скорость обезуглероживания снижалась. Такой характер расчетных кривых, по-видимому, можно объяснить только ухудшением условий взаимодействия кислородных струй с металлом из-за зафиксированного общего снижения уровня металлического расплава при верхней продувке. Снижение скорости обезуглероживания в реакционной зоне в рассматриваемом случае не компенсировалось интенсификацией окисления углерода в объеме ванны. На некоторых плавках все же отмечалось ускорение процесса обезуглероживания при содержании углерода $0,5 - 2,0 \%$ (рис. 2, а), что, как правило, сопровождалось кратковременным вскипанием расплава и дальнейшим понижением уровня металла.

Зафиксировано [9], что улучшение перемешивания ванны, очевидно, за счет дополнительного появления всплывающих пузырей оксида СО в объеме расплава все же будет способствовать интенсификации массообменных процес-

сов, повышению эффективности использования вдуваемого кислорода на окисление углерода и, соответственно, в целом ускорению процесса обезуглероживания. Возникновение некоторых затруднений при зарождении пузырей СО вне пределов реакционной зоны приводит к тому, что скорость обезуглероживания V_C остается неизменной или несколько понижается вплоть до критической концентрации углерода, после достижения которой происходит резкое падение параметра V_C при лимитировании процесса окисления углерода диффузией последнего к реакционной поверхности [10].

Например, при верхней продувке можно добиться более позднего снижения общей скорости обезуглероживания, если компенсировать ухудшение условий взаимодействия кислородной струи с расплавом в результате понижения уровня металлической ванны при соответствующем регламентированном уменьшении высоты фурмы над ванной на заключительном этапе операции. При комбинированной продувке для решения аналогичной проблемы таким технологическим приемом может быть увеличение интенсивности продувки расплава перемешивающим газом через днище.

При таком подходе по мере снижения концентрации углерода ниже переходных значений замедление скорости обезуглероживания в реакционной зоне должно сопровождаться увеличением реакционной поверхности и коэффициентов тепломассопереноса при интенсификации перемешивания конвертерной ванны и улучшения условий зарождения пузырей оксида углерода СО за пределами реакционной зоны. При комбинированной продувке за счет донной подачи перемешивающих газов вышеотмеченные условия в полной мере реализуются при определенных параметрах подачи газа через днище, что ведет к снижению величины $C_{пер}$ (рис. 1) и более стабильному ходу обезуглероживания на протяжении всей операции продувки (рис. 2, б).

Как установлено экспериментально, прием улучшения перемешивания расплава путем донной подачи азота с расходом $0,05 - 0,20 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$ всегда сопровождался снижением переходных концентраций углерода в интервале $0,9 - 1,2 \%$ (для верхней продувки) до $0,4 - 0,5 \%$, начиная с которых неиспользованный на окисление примесей в реакционной зоне кислород начинает интенсивно поступать вглубь расплава, при этом возрастает концентрация кислорода в металле в реакционной камере по сравнению со сравнительной.

В дальнейшем с понижением концентрации ниже $1,0 \%$ углерода в расплаве, подача через днище азота, особенно в пределах сравнительной камеры, устойчиво приводит к интенсифи-

кации процесса обезуглероживания в целом в объеме расплава.

Для определения коэффициентов массопереноса в конвертерной ванне на основании полученных экспериментальных данных была выполнена оценка эффективного коэффициента ($D_э$) диффузии углерода для различных периодов и условий.

При анализе и расчетах была принята следующая схема процессов тепломассопереноса в конвертерной ванне, продуваемой сверху кислородом и через днище нейтральным перемешивающим газом. Преимущественное окисление углерода в соответствии с полученными данными и общепринятыми подходами [11 – 13] в пределах реакционной зоны при взаимодействии кислородных струй с расплавом. Вследствие экзотермических реакций окисления примесей и части железа в рассматриваемой зоне также происходит преимущественное выделение тепла, что обеспечивает значительный перегрев реакционной зоны (до $600 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$) по отношению к остальному объему ванны [11 – 13]. Перегретый и лишенный части примесей расплав из пределов реакционной зоны распространяется в отдаленные участки ванны по замкнутым траекториям с возникновением нисходящих потоков вдоль стенок конвертера и восходящих навстречу внедряющимся кислородным струям. На характер упорядоченной циркуляции расплава определяющее влияние оказывает, прежде всего, поток выходящего из реакционной зоны оксида СО, а также интенсивность донной подачи перемешивающего нейтрального газа, число донных фурм и варианты размещения их в днище конвертера.

Общее перемешивание ванны пузырями СО, зарождающимися и всплывающими вне зоны продувки значительно сказывается на развитии тепломассообменных процессов только после понижения концентрации углерода ниже переходных значений, определенных экспериментами.

Принимаем, что зафиксированный перепад концентраций углерода при продувке конвертерной ванны в двухкамерном конвертере будет являться своеобразным фактором диффузионных затруднений при поставке окисляемых примесей в реакционную зону. При этом можно полагать, что разница в концентрации определяется соотношением интенсивности окисления примеси в реакционной зоне и скорости доставки примеси в эту зону, определяемой интенсивностью перемешивания ванны. Как установлено при исследованных параметрах комбинированной продувки в начальный и конечный периоды операции наблюдаются и при верхней продувке наибольшие затруднения в переносе окисляе-

мых примесей, что свидетельствует о имитировании скорости окислительных процессов в реакционной зоне диффузией к ней примесей. Наблюдаемый градиент концентраций в расплаве [14] обеспечивает при определенных параметрах продувки поставку в реакционную зону необходимого количества окисляемых элементов, что определяет расходование преобладающей части кислорода.

Параллельно с направленной постановкой примесей в пределы реакционной зоны фиксируется встречный перенос введенного индикатора (жидкой меди) из реакционной в сравнительную камеру конвертера [2].

Анализом отобранных с момента ввода индикатора проб металла зафиксирован практически один вид кривых выравнивания (отклика) трассера по объему ванны, состоящих из плавно восходящего, а после достижения максимума практически прямолинейного участков. Для такого вида кривых отклика для определения эффективных коэффициентов диффузии индикатора ($D_3^{си}$) можно использовать выражение [15]

$$D_3^{си} = \frac{r^2(\tau_2 - \tau_1)}{9,2\tau_1\tau_2 \lg[C_2/C_1(\tau_2/\tau_1)^{3/2}]}, \quad (5)$$

где r – расстояние от точки ввода индикатора; τ_1, τ_2 – время отбора проб; C_1, C_2 – концентрация индикатора в момент отбора проб.

По градиентам концентраций окисляемых примесей между реакционной зоной и объемом ванны необходимо задаться формой реакционной зоны для определения и оценки параметров массопереноса. В случае, если глубина проникновения струй кислорода в расплав близка по величине условному диаметру площади поверхности ванны при взаимодействии с газовыми струями, модель и форма реакционной зоны может быть принята в виде сферы с центром в точке пересечения оси фурмы с поверхностью ванны – модель 1. При реализации так называемой «жесткой» продувки возможно распространение реакционной зоны по оси фурмы уже практически на всю глубину ванны. В рассматриваемом случае характерные размеры газовых струй кислорода, распространяющихся в расплаве, и параметры образующейся реакционной зоны [16; 17] могут быть с известными допущениями приняты в форме цилиндра – модель 2.

Если в двух точках ванны Q_1 , находящихся от центра (модель 1) или оси (модель 2) реакционной зоны на расстоянии r_1 и Q_2 , находящейся соответственно на расстоянии r_2 ($r_2 > r_1$), будет зафиксирована разница концентраций $\Delta C = C_2 - C_1$, то эффективный коэффициент диффузии (D_3) при наличии конвективных потоков в ванне мо-

жет быть определен по следующему выражению [18] в соответствии с моделью 1:

$$q = 2\pi D_{31}^{1-2} (C_2 - C_1) \frac{r_2 r_1}{r_2 - r_1}, \quad (6)$$

где q – скорость массопереноса примеси, г/с; D_{31}^{1-2} – эффективный коэффициент диффузии в зоне между точками отбора пробы 1 и 2, рассчитанный по модели 1, см²/с.

В случае с модели 2 получаем

$$Q = \frac{2\pi D_{32}^{1-2} (C_2 - C_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (7)$$

где Q – количество вещества диффундирующего на единицу длины цилиндра, г/с·см; D_{31}^{1-2} – эффективный коэффициент диффузии в зоне между точками 1 и 2, рассчитанный по модели 2, см²/с.

При этом можно предполагать, что реальные условия взаимодействия газовых струй с расплавом находятся в диапазоне двух гипотетических моделей, а реальные коэффициенты диффузии заключены в пределах значений, соответствующих этим крайним случаям.

В дальнейшем по принятым моделям были просчитаны полученные экспериментальные данные для плавок, проведенных на лабораторных конвертерах. Расчеты вели по углероду, получая соответственно для моделей 1 и 2 параметры D_{31C}^{1-2} и D_{32C}^{1-2} , а также для введенного индикатора (присадки меди) D_{3Cu} использованием для расчета выражения (5).

Следует отметить, что само понятие эффективного коэффициента диффузии предполагает его равенство для любой примеси, растворенной в металлической ванне, независимо от ее молекулярного коэффициента диффузии и концентрации. Это свидетельствует о правомочности допущений к используемой методике расчета (рис. 3).

Характерные точки (рис. 4), полученные в экспериментах, расположены значительно ниже поля расчетных точек, полученных для промышленных конвертеров. В рассматриваемом случае применение донного перемешивания конвертерной ванны нейтральным газом будет способствовать увеличению значений D_3 (рис. 3, 4) по сравнению с обычной верхней кислородной продувкой. Более низкие значения D_3 для лабораторных агрегатов тогда можно объяснить влиянием геометрических размеров агрегата.

В работе было обращено внимание на факт роста параметра D_3 с увеличением размера агрегата, в котором находится металл [19]. В качестве характерного размера для лабораторных и про-

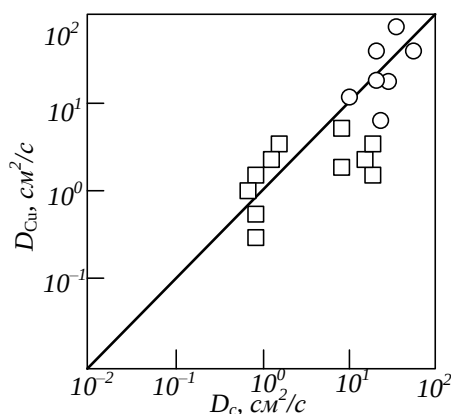


Рис. 3. Изменение величины D_{Cu} в зависимости от D_C :

□ – верхняя продувка (D_{3Cu});

○ – комбинированная продувка (D_{3Cu})

Fig. 3. Change in the D_{Cu} value depending on D_C :

□ – upper blowdown (D_{3Cu}); ○ – combined blowdown (D_{3Cu})

мысленных сталеплавильных агрегатов использовали параметр глубины ванны h .

Уравнение $\lg D_3 = 1,6(\lg h - 1,4)$, описывающее зависимость коэффициента диффузии от характеристического размера ванны [20; 21], охватывает лишь верхний предел найденного диапазона значений D_3 при рассматриваемой величине h , тем не менее можно зафиксировать выявлен-

ную связь этих двух параметров. При прочих равных условиях применение донного перемешивания нейтральным газом конвертерной ванны в лабораторных агрегатах способствует увеличению значений D_3 (рис. 4) в интервале с 20 до 270 $\text{см}^2/\text{с}$ по мере увеличения расхода донного дутья с 0,01 до 0,20 $\text{м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$. На основании полученных результатов (рис. 4) можно предполагать, что, например, в промышленных конвертерах емкостью 160 т с комбинированной продувкой эффективный коэффициент диффузии будет составлять 800 – 2800 $\text{см}^2/\text{с}$.

После достижения некоторой переходной концентрации углерода в металле наступает момент, когда не весь кислород может быть израсходован в реакционной зоне при недостатке массоподвода углерода к месту реакции. Наступает этап накопления кислорода уже в реакционной зоне, что вызывает перенос кислорода в объем ванны и создает предпосылки для развития реакции обезуглероживания уже на поверхности зарождения пузырей оксида CO на футеровке агрегата и на поверхности пузырей при их всплывании.

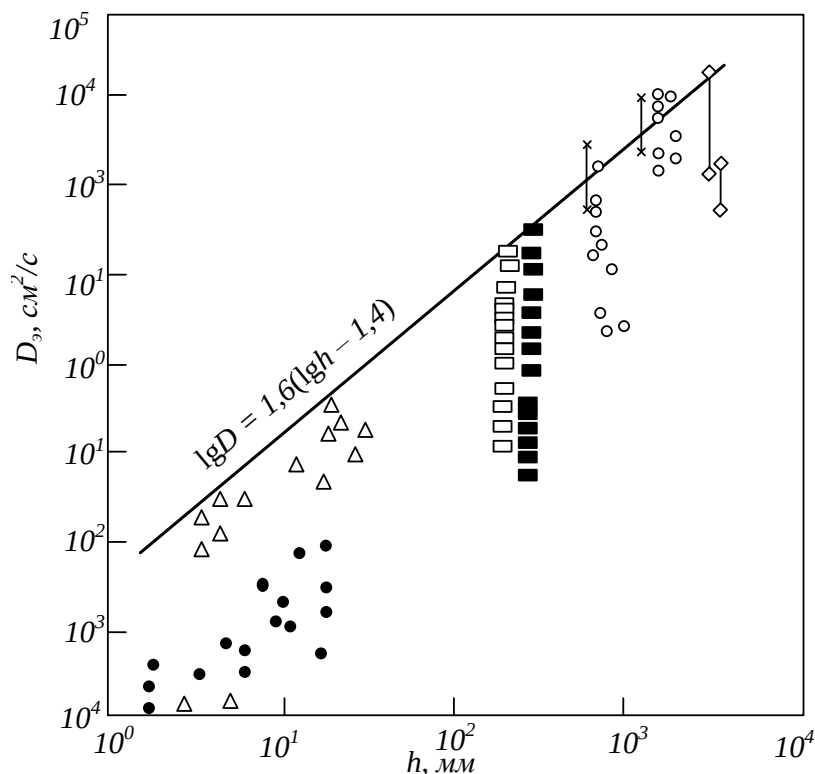


Рис. 4. Изменение коэффициента эффективной диффузии D_3 в зависимости от размеров сталеплавильной ванны:

□ – расчетные значения D_{31C}^{1-2} по модели 1; ■ – расчетные значения D_{32C}^{1-2} по модели 2;

○, ●, Δ, ◇, × – экспериментальные и расчетные данные

Fig. 4. Changing the effective diffusion coefficient D_3 depending on the size of the steelmaking bath:

□ – calculated values of D_{31C}^{1-2} according to model 1; ■ – calculated values of D_{32C}^{1-2} according to model 2;

○, ●, Δ, ◇, × – experimental and calculated data

Наряду с перемешиванием конвертерной ванны нейтральным газом, барботаж ее пузырями и СО, всплывающими от поверхности футеровки, должен также вызывать дополнительное увеличение массопереноса в объеме ванны, в частности, массопереноса углерода, и, соответственно, кратковременный рост скорости обезуглероживания.

Выводы

На основании проведенных исследований особенностей рафинирования конвертерной ванны и процессов тепломассопереноса при комбинированной продувке расплава при реализации модельного подхода определены численные значения D_3 , которые находятся в диапазоне в пределах 20 – 270 см²/с. С учетом геометрических факторов для промышленных конвертеров емкостью 160 т параметр D_3 будет ориентировочно составлять 800 – 2800 см²/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С., Полежаев С.А., Запольская Е.М. Анализ условий подобия и методики высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. Сообщение 1. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):75–84. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)
2. Протопопов Е.В., Фатьянов С.С., Запольская Е.М. Высокотемпературное моделирование процесса обезуглероживания конвертерной ванны при верхней и комбинированной продувке расплава. Сообщение 2. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):82–93. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-82-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-82-93)
3. Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Фатьянов С.С. Экспериментальные исследования обезуглероживания конвертерной ванны при комбинированной продувке расплава. В кн.: *Сборник трудов XVIII международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла*. 7-10 апреля 2025. Санкт-Петербург, 2025:182–189.
4. Григорович К.В. *Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития*. В кн.: *Труды XIV международного конгресса сталеплавильщиков*. Москва – Электро-сталь, 17-21 октября 2016 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2016:56–65.
5. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Совершенствование технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;4:43–50. EDN: SBYPGZ
6. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двух контурных фурм для кислородных конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1995;12:13–17.
7. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Лаврик Д.А., Мастеровенко Е.Л. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002;12:16–21. EDN: SIXMJT.
8. Lehner J., Egger M.W., Panhofer H., Strelbisky M.J. First operating experiences with post-combustion lances at BOF SHOP LD3. *European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017)*. Vienna, Austria. 26-29 June 2017. 2017;1(3):1148–1157.
9. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <http://doi.org/10.3390/pr8040483> EDN: KMPSKB
10. Vortrefflich W., Vries J. Maximizing BOF production capacity and producing cost efficient by using substance based process control. *Iron & Steel Review*. 2010;10:94–100.
11. Apeldoorn G.J., Gootjes P. Substances for BOF steelmaking. In: *Millennium Steel*. 2006:97–101.
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. Белов Г.В., Трусков Б.Г. *Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем*. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2013:96.
14. Zhiyong Liu, Alberto N. Conejo. Development of a Novel Dimensionless Relationship to Describe Mass Transfer in Ladles Due to Bottom Gas Injection. *Processes*. 2025;13:5. <https://doi.org/10.3390/pr13010005>
15. Martín M., Rendueles M., Día M. Steel-Slag Mass Transfer in Steel Converter, Bottom and Top/Bottom Combined Blowing Through Cold Model Experiments. *Chemical Engineering Research and Design*. 2005;83(9):1076–1084. <https://doi.org/10.1205/cherd.02156>
16. Cunha A.P., Pacianotto T.A., Frottini Fileti A.M. Steel-making process: Neural models improve end-point predictions. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2004;18(4):631–636. [http://doi.org/10.1016/S1570-7946\(04\)80171-8](http://doi.org/10.1016/S1570-7946(04)80171-8)

17. Gu M., Xu A., Wang H., Wang Z. Real-time dynamic carbon content prediction model for second blowing stage in BOF based on CBR and LSTM. *Processes*. 2021;9(11):1987. <http://doi.org/10.3390/pr9111987> EDN: ELGMRV
 18. Wiltshi K., Pinz A., Lindeberg T. An automatic assessment scheme for steel quality inspection. *Machine Vision and Applications*. 2000;12(3):113–128.
 19. Wu M., Wu F. Application of using dynamic control with off-gas analysis for making medium-high carbon steel. *Iron and Steel*. 2007;42(12):38–41.
 20. Vortrefflich W., Vries J. Maximizing BOF production capacity and producing cost efficient by using substance based process control. *Iron & Steel Review*. 2010;10:94–100.
 21. Zhou Wang*, Shuang Chen, Congcong Wu, Nan Chen, Jiwen Li, and Qing Liu. Effect of bottom stirring on bath mixing and transfer behavior during scrap melting in BOF steelmaking: A review. *High Temperature Materials and Processes*. 2024;43:20220322. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0322>
- REFERENCES**
1. Protopopov E.V., Umanskii A.A., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S., Polezhaev S.A., Zapol'skaya E.M. Analysis of similarity conditions and methods of high-temperature modeling of converter processes. Message 1. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):75–84. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)
 2. Protopopov E.V., Fat'yanov S.S., Zapol'skaya E.M. High-temperature modeling of the process of decarbonization of a converter bath during upper and combined steam purging. Message 2. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):82–93. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-82-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-82-93)
 3. Protopopov E.V., Shchipanov S.S., Fat'yanov S.S. Experimental studies of decarbonization of a converter bath during combined melt purging. In: *Proceedings of the XVIII International Congress of Steelmakers and Metal Producers*. April 7-10, 2025. Saint Petersburg, 2025:182–189. (In Russ.).
 4. 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.).
 5. Feiler S.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Perfection of the technology of combined purging of a converter bath with oxygen and neutral gas. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2014;4:43–50. (In Russ.). EDN: SBYPGZ
 6. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Development of tips for two contour tuyeres for oxygen converters. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1995;12:13–17. (In Russ.).
 7. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko E.L. Investigation of the structure and parameters of reaction zones during overhead purging in relation to the design of multi-target converter tuyeres. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2002;12:16–21. (In Russ.). EDN: SIXMJT.
 8. Lehner J., Egger M.W., Panhofer H., Strelbisky M.J. First operating experiences with post-combustion lances at BOF SHOP LD3. *European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017)*. Vienna, Austria. 26-29 June 2017. 2017;1(3):1148–1157.
 9. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <http://doi.org/10.3390/pr8040483> EDN: KMPSKB
 10. Vortrefflich W., Vries J. Maximizing BOF production capacity and producing cost efficient by using substance based process control. *Iron & Steel Review*. 2010;10:94–100.
 11. Apeldoorn G.J., Gootjes P. Sublances for BOF steelmaking. In: *Millennium Steel*. 2006:97–101.
 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. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic modeling of chemically reacting systems*. Moscow: Izd. MGTU im. N.E. Bauman; 2013;96. (In Russ.).
 14. Zhiyong Liu, Alberto N. Conejo. Development of a Novel Dimensionless Relationship to Describe Mass Transfer in Ladles Due to Bottom Gas Injection. *Processes*. 2025;13:5. <https://doi.org/10.3390/pr13010005>
 15. Martín M., Rendueles M., Día M. Steel-Slag Mass Transfer in Steel Converter, Bottom and Top/Bottom Combined Blowing Through Cold Model Experiments. *Chemical Engineering Research and Design*. 2005;83(9):1076–1084. <https://doi.org/10.1205/cherd.02156>
 16. Cunha A.P., Pacianotto T.A., Frottini Fileti A.M. Steel-making process: Neural models improve end-point predictions. *Computer Aided Chemi-*

- cal Engineering*. 2004;18(4):631–636.
[http://doi.org/10.1016/S1570-7946\(04\)80171-8](http://doi.org/10.1016/S1570-7946(04)80171-8)
17. Gu M., Xu A., Wang H., Wang Z. Real-time dynamic carbon content prediction model for second blowing stage in BOF based on CBR and LSTM. *Processes*. 2021;9(11):1987.
<http://doi.org/10.3390/pr9111987>
EDN: ELGMRV
 18. Wiltshi K., Pinz A., Lindeberg T. An automatic assessment scheme for steel quality inspection. *Machine Vision and Applications*. 2000;12(3):113–128.
 19. Wu M., Wu F. Application of using dynamic control with off-gas analysis for making medium-high carbon steel. *Iron and Steel*. 2007;42(12):38–41.
 20. Vortrefflich W., Vries J. Maximizing BOF production capacity and producing cost efficient by using substance based process control. *Iron & Steel Review*. 2010;10:94–100.
 21. Zhou Wang*, Shuang Chen, Congcong Wu, Nan Chen, Jiwen Li, and Qing Liu. Effect of bottom stirring on bath mixing and transfer behavior during scrap melting in BOF steelmaking: A review. *High Temperature Materials and Processes*. 2024;43:20220322.
<https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0322>

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 техно-

логии, Сибирский государственный индустриальный университет

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, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Sergei S. Fat'yanov, Master's student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

Ekaterina M. Zapol'skaya, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the 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 28.10.2025

После доработки 19.11.2025

Принята к публикации 23.11.2025

Received 28.10.2025

Revised 19.11.2025

Accepted 23.11.2025