

Оригинальная статья

УДК 669.184.244.62

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОДОБИЯ И МЕТОДИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕРТЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ. СООБЩЕНИЕ 1**

© 2025 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, Е. А. Беленецкий, С. С. Фатьянов,
С. А. Полежаев, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Рабочее пространство конвертера рассматривается как совокупность отдельных реакционных зон, что способствует изучению механизма физико-химических явлений в каждой зоне и в целом в системе кислородные струи – металл – шлак – отходящий поток газов. Выполнение условий подобия позволяет в некотором диапазоне качественно реализовывать высокотемпературное моделирование, а частичное нарушение тех или иных условий подобия будет приводить к осуществлению только приближенного моделирования. Выполнены анализ и обоснование основных положений методики высокотемпературного моделирования конвертерного процесса с комбинированной продувкой конвертерной ванны. Сформированы основные условия аэрогидродинамического и динамического подобия при использовании для продувки расплава разноимпульсных газовых потоков, которые в совокупности с условиями геометрического и физического подобий позволяют с большей достоверностью переносить полученные результаты с модели на образец. Предварительно для каждого эксперимента разрабатывается технологическая карта, обеспечивающая заданные параметры дутьевого и шлакового режимов плавки с использованием присадок фракционных извести и плавикового шпата. Рассмотренные условия и основные безразмерные критерии подобия позволяют переносить полученные результаты на промышленные образцы. Разработан и усовершенствован комплекс лабораторных установок и методик, позволяющих с использованием фото- и видеосъемки визуализировать процесс взаимодействия газовых струй с шлако-металлической эмульсией в конвертере, получать информацию о параметрах образующихся реакционных зон и выходе газов на поверхность металлической ванны.

Ключевые слова: теория подобия, высокотемпературное моделирование, конвертер, комбинированная продувка

Для цитирования: 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)

Original article

**THE ANALYSIS OF SIMILARITY CONDITIONS AND
THE METHODOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE MODELING
OF CONVERTER PROCESSES. MESSAGE 1**

© 2025 E. V. Protopopov, A. A. Umanskii, E. A. Belenetskii, S. S. Fat'yanov, S. A. Polezhaev,
E. M. Zapol'skaya

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 650007, Russian Federation)

Abstract. The working space of the converter is considered as a set of separate reaction zones, which contributes to the study of the mechanism of physico-chemical phenomena in each zone and in the oxygen jets – metal – slag – exhaust gas system as a whole. The fulfillment of similarity conditions allows high-temperature modeling to be

qualitatively implemented in a certain range, and a partial violation of one or another of the considered similarity conditions will lead to the implementation of only approximate modeling. The analysis and substantiation of the main provisions of the methodology of high-temperature modeling of the converter process with combined purging of the converter bath has been performed. The basic conditions of aerohydrodynamic and dynamic similarity are formed when using multi-pulse gas flows for purging a melt, which, together with the conditions of geometric and physical similarity, make it possible to transfer the results obtained from the model to the sample with greater reliability. A technological map is developed preliminarily for each experiment, providing the specified parameters of blast and slag melting modes using fractional lime and fluorspar additives. The considered conditions and the basic dimensionless similarity criteria make it possible to transfer the results obtained to industrial designs. A set of laboratory facilities and techniques has been developed and improved that make it possible to visualize the interaction of gas jets with a slag-metal emulsion in a converter using photo and video recordings, to obtain information about the parameters of the reaction zones formed and the gases escaping to the surface of a metal bath.

Keywords: similarity theory, high temperature modeling, converter, combined purge

For citation: 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. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)

Введение

В соответствии с накопленным уровнем знаний значительный объем информации может быть получен в лабораторных условиях при использовании высокотемпературного моделирования с соблюдением подобия процессов, происходящих в натурных условиях [1 – 6], которые в дальнейшем могут привести к новым технологическим и конструктивным решениям [7 – 10]. В отличие от производственных плавок исследования на моделях конвертеров позволяют отбирать большое количество различных проб, широко варьировать условия и характер проведения экспериментов, проводить наблюдения за ходом продувки и, что особенно важно, получать информацию об аэродинамике процесса с фиксацией физических явлений фото- и видеосъемкой.

Впервые представленный в работе [1] принцип рассмотрения рабочего пространства конвертера как совокупность отдельных реакционных зон, безусловно, способствовал сосредоточению усилий на изучении механизма физико-химических явлений в каждой зоне и в целом в системе кислородные струи – металл – шлак – отходящий поток газов. Достигнутые при этом результаты исследований положительно сказались в прикладном аспекте на совершенствовании технологии процесса с верхней продувкой, созданию целого ряда новых конструкций дутьевых устройств с подачей разноимпульсных газовых струй для интенсификации продувки, а также позволили более осознанно подойти к освоению различных вариантов технологии с донным и/или комбинированным дутьем [11 – 15].

Следует отметить, что при газовой продувке жидкой ванны условия достаточно полного по-

добия гидродинамических и массообменных процессов можно выразить в общем виде следующим критериальным соотношением [8; 17; 18]:

$$F(\text{Sh}; \text{Fo}; \text{Fr}; \text{En}; \text{Re}; \text{We}; \bar{\rho}; \bar{v}; \bar{u}; \text{Ma}; \kappa; \bar{l}_1; \bar{l}_2 \dots \bar{l}_n; \text{Sc}) = 0, \quad (1)$$

где Sh; Fo; Fr; En; Re; We; Ma; Sc – числа Шервуда, Фурье, Фруда, Эйлера, Рейнольдса, Вебера, Маха, Шмидта; $\bar{\rho}$, $\bar{v}$, $\bar{u}$ и $\bar{l}_i$ – критерии, характеризующие геометрические размеры агрегатов, соотношения плотностей, вязкостей и скоростей взаимодействующих фаз.

Одновременное соблюдение равенства для модели и образца такого числа критериев практически невозможно, а отсутствие равенства затрудняет проведение соответствующих исследований и может привести к ошибкам в рекомендациях. Поэтому, как правило, в каждом конкретном случае в зависимости от поставленных задач исследования используется только определяющие процесс критерии или их модификация.

Представляя высокотемпературное моделирование как метод экспериментальных исследований аэрогидродинамических, физико-химических или тепловых явлений на уменьшенной модели промышленного конвертера, необходимо обеспечить, чтобы аналогичные явления в модели и образце были полностью подобны:

- физический процесс, характеризующийся одинаковыми физико-химическими величинами, подчиняющийся законам аэрогидродинамики и тепломассообмена, описываемый одинаковыми дифференциальными уравнениями;
- геометрическое подобие модели образцу;

– динамическое подобие модели образцу.

В рассматриваемом случае безразмерные определяющие критерии подобия в модели и образце должны иметь одинаковые численные значения.

Выполнение этих условий позволяет в некотором диапазоне качественно реализовывать высокотемпературное моделирование, а частичное нарушение тех или иных из перечисленных выше условий подобия будет приводить к осуществлению только приближенного моделирования.

В условиях экспериментов легко выполняется геометрическое подобие образца и модели по основным параметрам рабочего пространства конвертерного агрегата с возможным дополнительным характерным размещением донных или боковых дутьевых устройств. Рассматриваемое условие выполняется без особых затруднений с соблюдением следующего соотношения:

$$\frac{H_{CB}}{H_{CB}} = \frac{H_P}{H_P} = \frac{H_{Ц}}{H_{Ц}} = \frac{H_K}{H_K} = \frac{H_B}{H_B} = \frac{h'_B}{h_B} = \dots$$

$$= \frac{D'_Г}{D_Г} = \frac{D'_Ц}{D_Ц} = \frac{D'_д}{D_д} = C_L, \quad (2)$$

где H_P , $H_{Ц}$, H_K и H_{CB} – высота рабочего пространства, цилиндрической, конической частей конвертера и свободного рабочего пространства над уровнем ванны в спокойном состоянии; h_B – глубина металлической ванны в спокойном состоянии; $D_Г$ и $D_Ц$ – диаметр горловины и ванны в цилиндрической части конвертера; $D_д$ – диаметр окружности расположения донных фурм; H_B – высота размещения боковых фурм от уровня днища; C_L – константа геометрического подобия линейных величин; здесь и далее штрих относится к обозначениям для модели.

При такой сложной совокупности процессов, определяющих технологический режим конвертерной плавки, аэрогидродинамические процессы, связанные с организацией рационального дутьевого режима, играют решающую роль. Обеспечение физического подобия «горячей» модели и образца будут соблюдаться в полной мере, при этом физические характеристики (плотность ρ , вязкость ν , поверхностное натяжение σ и другие) взаимодействующих газовой (г), металлической (м) и шлаковой (ш) фаз будут совершенно одинаковыми по величине в точках образца и модели при одних и тех же исходных условиях эксперимента:

$$\frac{\rho'_м}{\rho_м} = \frac{\rho'_ш}{\rho_ш} = \frac{\rho'_г}{\rho_г} = \frac{\nu'_м}{\nu_м} = \frac{\nu'_ш}{\nu_ш} = \frac{\nu'_г}{\nu_г} = \frac{\sigma'_м}{\sigma_м} = \frac{\sigma'_ш}{\sigma_ш} = C_\Phi, \quad (3)$$

а их отношение C_Φ будет постоянным и равным единице.

Обеспечив геометрическое подобие рабочего пространства конвертера, в котором протекают одинаковой природы физико-химические явления, необходимо задаться основными условиями аэрогидродинамического подобия, под которыми подразумевается, прежде всего, выполнение динамического подобия.

Поскольку при комбинированной продувке конвертерной ванны основные и вспомогательные кислородные струи, а также струи всевозможных технологических газов управляют практически всеми физико-химическими процессами, происходящими между газовой, металлической и шлаковой фазами, важно обеспечить подобие на модели и образце параметров режима продувки:

– струйного течения разноимпульсных газовых потоков, формируемых в различного типа верхних донных и боковых дутьевых устройствах, а также характер их взаимодействия с расплавом и отходящими газами;

– особенности воздействия верхних многоярусных, боковых или донных кислородных или других газовых струй непосредственно на металлическую и шлаковую фазы конвертерной ванны;

– поведения конвертерной ванны в ходе продувки (характерного изменения уровня ванны, вспенивания металлической и шлаковой фаз, возникновения волн, брызг и направленных циркуляционных потоков, образования выбросов шлако-металлической эмульсии и выносов мелких капель металла).

Так как процесс организации продувки конвертерной ванны является определяющим во всем сложном комплексе взаимосвязанных явлений при выплавке стали, то особенно важно соблюсти динамическое подобие в дутьевом режиме операции.

В соответствии с ранее полученными данными [6] для обеспечения подобия струйного течения газов на модели и образце должны соблюдаться равенства следующих безразмерных комплексов физических величин: $\rho_0/\rho_0 w_0^2$, k , w_0/a_0 , $p_0/\rho_0 a_0^2$.

При анализе работ [8; 19; 20] видно, что эти комплексы являются известными критериями (числами) Эйлера ($\epsilon_u = p_0/\rho_0 w_0^2$), Пуассона ($k = C_p/C_v$, где C_p и C_v – изобарная и изохорная теплоемкости газов Маха ($Ma = w_0/a_0$), где w_0 и a_0 – скорость истечения газа из сопла и скорость звука.

Для выполнения аэродинамического подобия струйных газовых потоков необходимо выполнение следующей критериальной зависимости:

$$f(\epsilon_u^{\text{нач}}, \epsilon_u^{\text{вых}}, Ma, k, n, \bar{\rho}, \bar{T}) = 0. \quad (5)$$

Причем обеспечение на «горячей» модели и образце одинаковых численных значений $\varepsilon_{\text{нач}}^{\text{нач}}$, $\varepsilon_{\text{вых}}^{\text{вых}}$, Ma , k , n , $\bar{p}$, $\bar{T}$ для струйных разноимпульсных газовых потоков достигается, например, при обычной верхней или комбинированной кислородной продувке соблюдением равенства удельного расхода дутья G_{O_2} , $\text{м}^3 (\text{кг} \cdot \text{с})$, давления и температуры подаваемого на продувку кислорода перед соплами геометрически подобных многоструйных фурм, общепринятый подход к расчету которых описан в работах [8; 9; 21].

Важнейшей характеристикой истекающей из сопла газовой струи является ее импульс [8; 22]:

$$i = m w_{\text{вых}} + F_{\text{вых}}(P_{\text{вых}} - P_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где m – массовый расход газа через сопло в единицу времени; F – площадь сечения выходного сопла.

При использовании сопел Лавалья и получении сверхзвуковых скоростей истечения при работе сопла в расчетном режиме ($P_{\text{вых}} = P_{\text{окр}}$), импульс газовой струи будет

$$i = m w_{\text{вых}}, \quad (7)$$

где $w_{\text{вых}}$, $P_{\text{вых}}$ – скорость, м/с, и давление, МПа, струи в выходном сечении сопла; $P_{\text{окр}}$ – давление в рабочем пространстве конвертера, МПа.

Причем увеличение импульса струи всегда будет способствовать увеличению ее дальности (динамического напора) и повышать интенсивность ее взаимодействия с ванной. Если все длины измерять в диаметрах сопла, то при одинаковом давлении и температуре газа перед соплом, геометрически подобных соплах и одинаковых газах для основных параметров в струе (например, осевая и осредненная скорости струи, угол раскрытия, плотность, температура и т.д.) получаются идентичные значения.

При определении оптимального вида параметра (критерия) динамического подобия, наиболее важного для изучения характеристик аэродинамических процессов в двухфазных средах для описания процесса целесообразно использовать одну из форм критерия Ньютона, представляющего собой отношение потенциальной энергии к кинетической [22; 23]:

$$Ne = \frac{f l}{m w_{\text{вых}}^2}, \quad (8)$$

где f – сила; l – длина траектории, проходимой частицами в подобных системах за подобные отрезки времени.

Поэтому при условии постоянства критерия Ньютона в «горячей» модели и образце, а также

представления, что аэрогидродинамические явления, происходящие в конвертерной ванне, в преобладающей степени определяются взаимодействием инерционных сил газовых струй и сил тяжести расплава, можно преобразовать его как число C_g динамического подобия при продувке конвертерной ванны [2; 4; 18; 20]:

$$\frac{m_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{m_{\text{Mg}} g l_0} = \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 F_{\Gamma}}{\rho_{\text{M}} F_{\text{ц}} h_{\text{Bg}}} = \frac{I_{\Gamma}}{m_{\text{Mg}} g} = C_g = \text{idem}, \quad (9)$$

где I_{Γ} – полный импульс газовых струй, определяющий силу воздействия струй на ванну, кг м/с^2 ; m – садка конвертера; F_{Γ} – площадь критического сечения дутьевых сопел, м^2 ; $F_{\text{ц}}$ – площадь сечения конвертерной ванны в цилиндрической части, м^2 ; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ; C_g – критерий динамического подобия процесса продувки конвертерной ванны.

Тогда с учетом критерия C_g и конструктивных особенностей фурмы применительно к верхней многоструйной кислородной продувке основные условия динамического подобия будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{O_2}^B \cos \alpha \frac{n^B}{(m_{\text{Mg}})} &= \text{idem}; \\ H_{\text{ф}}/d_{\text{вых}} &= \text{idem}; \\ d_0^B/D_{\text{ц}} &= \text{idem}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $i_{O_2}^B$ – импульс отдельной верхней кислородной струи; n^B и α – количество сопел в головке фурмы и угол наклона их к вертикали соответственно; $H_{\text{ф}}$ – высота фурмы над уровнем ванны; $d_{\text{вых}}$ – диаметр окружности расположения сопла на торце головки.

В случае верхней подачи двух регулируемых разноимпульсных потоков кислорода через специальные конструкции дутьевых устройств в условиях динамического подобия (9) и (10) необходимо использовать следующее соотношение:

$$\left. \begin{aligned} i_{O_2\text{доп}}^B \cos \alpha_{\text{доп}} n_{\text{доп}}^B - i_{O_2\text{осн}}^B \cos \alpha n_{\text{осн}}^B &= \\ &= \text{idem}; \\ H_{\text{я}}/d_{\text{вых}}^{\text{доп}} &= \text{idem}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $i_{O_2\text{доп}}^B$ и $i_{O_2\text{осн}}^B$ – импульсы разноскоростных основных и дополнительных кислородных струй; $n_{\text{осн}}^B$ и $n_{\text{доп}}^B$ – число основных и дополнительных сопел в фурме; $H_{\text{я}}$ – расстояние между ярусами основных и дополнительных сопел по стволу фурмы; $d_{\text{вых}}^{\text{доп}}$ – диаметр выходного сечения дополнительного сопла.

При комбинированной продувке конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище условия

динамического подобия выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{i_{\text{O}_2}^{\text{B}} \cos \alpha n_{\text{B}}}{m_{\text{Mg}}} &= idem; \quad \frac{H_{\Phi}}{d_{\text{вых}}^{\text{B}}} = idem; \\ \frac{d_0^{\text{B}}}{D_{\text{ц}}} &= idem; \\ \frac{i_{\text{нт}}^{\text{Д}} n_{\text{Д}}}{i_{\text{O}_2}^{\text{B}} n_{\text{B}}} &= idem; \quad \frac{d_0^{\text{B}}}{d_0^{\text{Д}}} = idem, \end{aligned} \quad (12)$$

где $i_{\text{нт}}^{\text{Д}}$ – импульс отдельного донного потока нейтрального газа; $n_{\text{Д}}$ – число донных фурм; $d_0^{\text{Д}}$ – диаметр окружности расположения донных фурм.

Если суммарный импульс кислородных струй $\sum i$ отнести к массе жидкого металла m , то условия перехода к различным режимам продувки при использовании специальных фурм можно представить следующим выражением, учитывающим изменение масштаба процесса:

$$H_{\Phi} = f\left(\sqrt[3]{\frac{i}{P_{\text{м}} g}}\right). \quad (13)$$

С использованием таких моделей при описании процесса можно эффективно представлять полученные материалы видео- и фотосъемки поведения реакционной зоны и движения потоков отходящих газов при продувке в лабораторном конвертере.

Выполненный анализ показывает, что при высокотемпературном моделировании без особых затруднений удастся обеспечить динамическое подобие в дутьевом режиме операции при использовании различных технологических газов, где модель и прототип полностью соответствуют протеканию операции продувки, строению и характеру поведения реакционных зон, особенностям выхода отходящих газов, общему характеру развития макрофизических явлений в полости конвертера (уровень вспенивания металла и шлака, образование брызг, всплесков, выбросов, выносов).

Рассмотренные условия и основные безразмерные критерии подобия позволяют полностью обосновать выбранные направления исследований и переносить полученные результаты на промышленные образцы.

Выполнение условий подобия при проведении высокотемпературных исследований предусматривает разработку и использование специальных установок и методик для выполнения экспериментов и контроля протекающих процессов с целью получения информации о различных характеристиках процесса (рис. 1).

Накопленный ранее опыт исследований с использованием «горячего» моделирования [24 – 32] послужил основой для модернизации многоцелевой установки по изучению механизма явлений, сопровождающих комбинированную продувку конвертерной ванны двухъярусными газовыми струями сверху и нейтральными газовыми струями через днище. Основные параметры установки, детальное описание схем контроля и регулирования, организация проведения экспериментов отражены в работе [33]. Значительный объем экспериментальных исследований был выполнен на усовершенствованной и модернизированной установке конвертера емкостью 60 кг (рис. 2).

По аналогии с работами [2; 16; 24; 29] фото- и видеосъемка макрофизических явлений, сопровождающих комбинированную продувку, осуществляется через специальное смотровое окно в верхнем конусе горловины (рис. 1).

Футеровка такого конвертера обычно выполняется из обожженного магнезитового порошка путем набивки по шаблонам. В качестве связки применяли жидкое стекло, при этом для уменьшения теплотеря между корпусом и футеровкой укладываем плиты каолиновой ваты и слой листового асбеста.

Обжиг и разогрев футеровки конвертера перед плавкой осуществляются путем сжигания загруженного в конвертер кокса с подачей для сжигания последнего компрессорного воздуха. Отвод образующихся дымовых газов в ходе разогрева футеровки и продувки конвертерной ванны осуществляется через газоотводящий тракт, соединенный с дымососом. Для продувки расплава используются различные варианты конструкций двухпоточных кислородных фурм, спроектированных с учетом ранее полученных данных (рис. 3) [9].

Принципиальной особенностью таких фурм является возможность создания групповых сверхзвуковых кислородных струй, истекающих из сопел Лаваля нижней головки фурмы, обособленных или объединенных реакционных зон интенсивного выхода потока оксида СО на поверхность ванны группой других сопел, разнесенных по стволу фурмы возможность получения более низкоскоростных струй, обеспечивающих дожигание отходящих газов для улучшения теплового баланса (рис. 3).

При проведении таких экспериментов жидкий низкомарганцовистый чугун (4,00 – 4,50 % С; 0,60 – 0,80 % Si; 0,20 – 0,30 % Mn; 0,012 – 0,035 % S и 0,10 – 0,35 % P) предварительно расплавляли в тигле индукционной печи емкостью 160 кг для дальнейшей заливки чугуна в конвертер при температуре 1350 – 1400 °С.

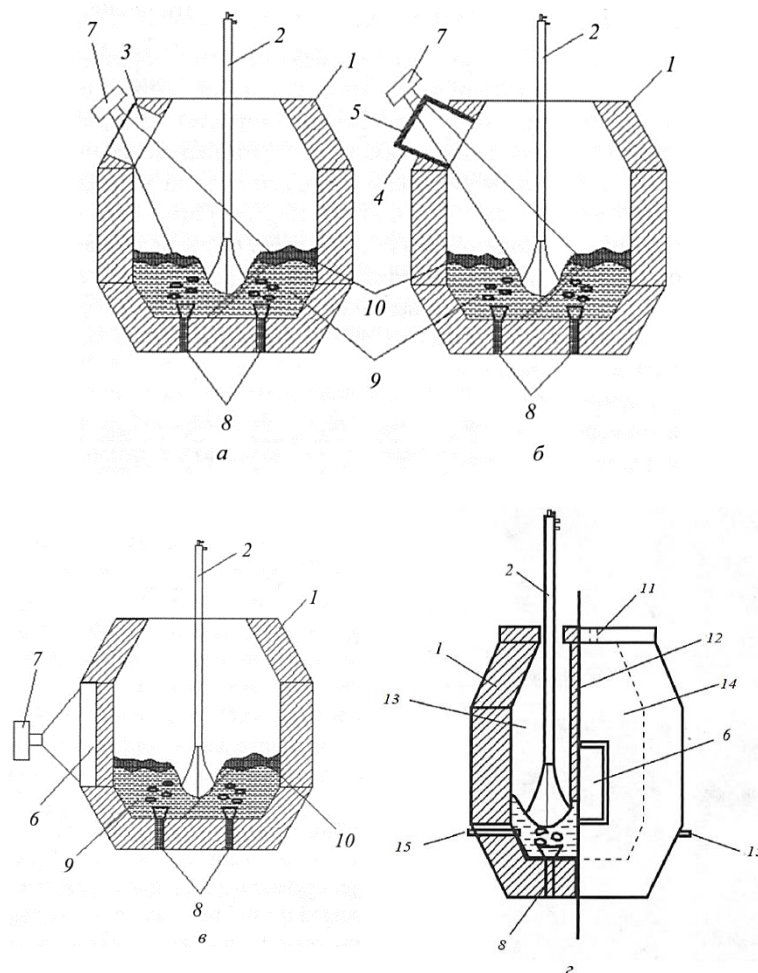


Рис. 1. Схема лабораторных конвертеров высокотемпературного моделирования по изучению комбинированных процессов с использованием смотрового окна (а), смотровой трубы (б), прозрачной стенки (в) и двухкамерного конвертера (г):

1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – смотровое окно; 4 – смотровая труба; 5 – кварцевое стекло;
6 – прозрачная кварцевая стенка; 7 – фотокинокамера; 8 – донные фурмы; 9 – металл; 10 – шлак;
11 – калиброванные отверстия в крышке конвертера; 12 – огнеупорная перегородка между камерами;
13 и 14 – сравнительная и реакционная камеры; 15 – термопары

Fig. 1. Schematic diagram of laboratory converters for high-temperature modeling for studying combined processes using a viewing window (a), viewing pipe (б), transparent wall (в) and a two-chamber converter (г):

1 – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – viewing window; 4 – viewing pipe; 5 – quartz glass; 6 – transparent quartz wall;
7 – photo-movie camera; 8 – bottom tuyeres; 9 – metal; 10 – slag; 11 – calibrated holes in the converter cover;
12 – refractory partition between chambers; 13 and 14 – comparison and reaction chambers; 15 – thermocouples

Предварительно для каждого эксперимента разрабатывается технологическая карта, обеспечивающая заданные параметры дутьевого и шлакового режимов плавки с использованием присадок фракционных извести и плавикового шпата. По ходу продувки отбираются пробы металла и шлака, далее после падения факела горения отходящих газов над горловиной агрегата заканчивали продувку расплава. Температура металла по ходу продувки обычно изменялась в пределах от 1400 – 1450 в начале до 1600 – 1650 °С в конце операции.

Выводы

Выполнены анализ и обоснование основных положений методики высокотемпературного моделирования конвертерного процесса с комбинирован-

ной продувкой конвертерной ванны. Сформированы основные условия аэрогидродинамического и динамического подобия при использовании для продувки расплава разноимпульсных газовых потоков, которые в совокупности с условиями геометрического и физического подобия позволяют с большей достоверностью переносить полученные результаты с модели на образец. Разработан и усовершенствован комплекс лабораторных установок и методик, позволяющих с использованием фото- и видеосъемки визуализировать процесс взаимодействия газовых струй со шлако-металлической эмульсией в конвертере, получать информацию о параметрах образующихся реакционных зон и выходе газов на поверхность металлической ванны.

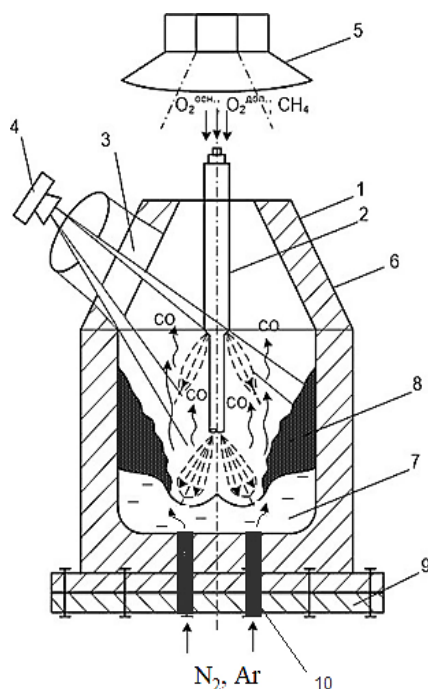


Рис. 2. Принципиальная схема устройства многоцелевой
конвертерной установки:

- 1 – конвертер емкостью 60 кг; 2 – двухъярусная фурма;
3 – смотровое окно; 4 – фото- и видеоаппаратура;
5 – газоотводящий тракт; 6 – футеровка; 7 – металл;
8 – шлак; 9 – отъемное днище; 10 – донные фурмы
- ig. 2. Schematic diagram of the multi-purpose converter plant
- converter 60 kg; 2 – two-tier tuyere; 3 – inspection window
4 – photo and video equipment; 5 – gas exhaust duct;
6 – lining; 7 – metal; 8 – slag; 9 – removable bottom,
10 – bottom tuyeres

Fig. 2. Schematic diagram of the multi-purpose converter plant:
1 – converter 60 kg; 2 – two-tier tuyere; 3 – inspection window;
4 – photo and video equipment; 5 – gas exhaust duct;
6 – lining; 7 – metal; 8 – slag; 9 – removable bottom,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коотц Т., Беренс К., Маас Г., Баумгартен П. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса. Дискуссия. *Черные металлы*. 1965;15:42–52.

2. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И., Никитин Ю.П., Дорошенко В.А. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1974;12:33–37.
3. Borowsld K., Maatsch I. Technische Mitteilungen Krupp: *Forschungsberichte*. 1964;22:63–64.
4. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1978;4:40–46.
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. *Сравнительная характеристика состояния кислородноконвертерного производства стали в России и за рубежом*. Москва: Элиз; 2000:64.
6. Буданов И.А., Устинов В.С. Перспективы развития металлургического производства в России. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;(5(1373)):3–12.
7. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса*. Киев-Донецк: Вища школа. 1981:83.
8. Явойский В.И., Дорофеев Г.А, Повх И.Л. *Теория продувки сталеплавильной ванны*. Москва: Металлургия. 1974:495.
9. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двух контурных фурм для кислородных конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1995;12:13–17.

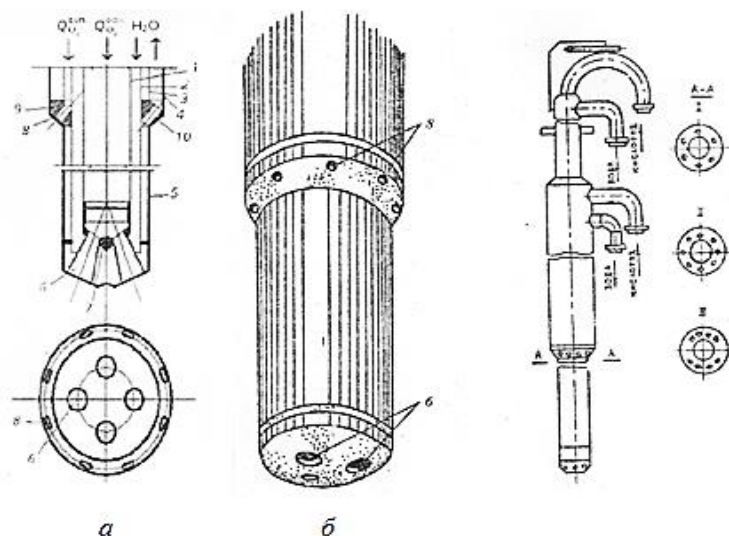


Рис. 3. Схема конструкции (а) и общий вид (б) двухъярусной фурмы:

- Fig. 3. Design diagram (a) and general view (b) of a two-tier tuyere:
1 – inner tube; 2, 3 – intermediate tubes; 4, 5 – outer tubes; 6 – main Laval nozzles; 7 – tuyere tip; 8 – nozzles for CO afterburning;
9 – upper nozzle block; 10 – grooves for water passage

10. 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;10:20–24.
11. Brun L.C. Overcapacity in Steel: China's Role in Global Problem. Center of Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University; 2016:54
12. Yusupkhodjayev A.A. *Theory Waste Free Technology on the Ferrous Metallurgy*. Tashkent: TSTU; 2017:4
13. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
14. 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>
15. Matsubae-Yokoyama K., Kubo H., Nagasaka T. Recycling effects of residual slag after magnetic separation for phosphorus recovery from hot metal dephosphorization slag. *ISIJ International*. 2009;95(3):306–312.
16. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;10:5–9.
17. Марков Б.Л. *Физическое моделирование в металлургии*. Москва: Металлургия. 1984:120.
18. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании конвертерных процессов. Аэрогидродинамическое подобие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;8:26–31.
19. Ляхтер В.М., Прудовский А.М. *Гидравлическое моделирование*. Москва: Энергоатомиздат. 1984:292.
20. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;12:16–18.
21. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. *Конвертерные процессы производства стали*. Киев-Донецк: Вища школа. 1984:344.
22. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г. Модель процесса рафинирования металла при продувке его кислородом сверху. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1972;10:61–64.
23. Сизов А.М. *Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах*. Москва: Металлургия. 1987:256.
24. Охотский В.Б., Баптизманский В.И., Просви́рин К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1973;8:50–53.
25. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И., Никитин Ю.П., Дорошенко В.А. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1974;12:33–37.
26. Зарвин Е. Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975;2:37–42.
27. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н. Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1977;12:61–65.
28. 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;10:54–59.
29. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;6:17–24.
30. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. О повышении эффективности продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов в полости конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;2:1–5.
31. 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;4:25–30.
32. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;6:17–24.
33. Разработка и создание испытательного полигона по изучению конвертерных процессов. Отчет по НИР. Сибирский металлургический институт (СМИ). Руководитель Протопопов Е.В. Инв. № 02920005710. Новокузнецк. 1991:64.

REFERENCES

1. Kootts T., Berens K., Maas G., Baumgarten P. Some questions of the theory of the oxygen-converter process. Discussion. *Chernye metal-ly*. 1965;15:42–52. (In Russ.).
2. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Study of the process of purging a converter bath using photo and film photography. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1974;12:33–37. (In Russ.).
3. Borowsld K., Maatsch I. *Technische Mitteil-ungen Krupp: Forschungsberichte*. 1964; 22:63, 64.
4. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. On the issue of hot modeling of the oxygen-converter pro-cess. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1978;4:40–46. (In Russ.).
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative characteristics of the state of oxygen converter steel production in Russia and abroad*. Mos-cow: Eliz; 2000:64. (In Russ.).
6. Budanov I.A., Ustinov V.S. Prospects for de-velopment of metallurgical production in Rus-sia. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014;(5(1373)):3–12. (In Russ.).
7. Baptizanskii V.I., Okhotskii V.B. *Physico-chemical principles of the oxygen converter process*. Kiev–Donetsk: Vishcha shkola. 1981:83. (In Russ.).
8. Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *The-ory of steel bath blowing*. Moscow: Metal-lurgiya. 1974:495. (In Russ.).
9. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Devel-opment of tips for two contour tuyeres for oxy-gen converters. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1995;12:13–17. (In Russ.).
10. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gra-dients in a converter bath using high-tem-perature modeling. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1997;10:20–24. (In Russ.).
11. Brun L.C. Overcapacity in Steel: China's Role in Global Problem. Center of Globalization, Governance & Competitiveness, Duke Univer-sity; 2016:54
12. Yusupkhodjayev A.A. *Theory Waste Free Technology on the Ferrous Metallurgy*. Tash-ken: TSTU; 2017:4
13. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustai nable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
14. 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>
15. Matsubae-Yokoyama K., Kubo H., Nagasaka T. Recycling effects of residual slag after magnet-ic separation for phosphorus recovery from hot metal dephosphorization slag. *ISIJ Interna-tional*. 2009;95(3):306–312.
16. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Study of the interaction of oxygen jets with converter exhaust gases. *Izvestiya vuzov. Chernaya met-allurgiya*. 1996;10:5–9. (In Russ.).
17. Markov B.L. *Physical modeling in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1984:120. (In Russ.).
18. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Simi-larity conditions in high-temperature modeling of converter processes. *Aerohydrodynamic similarity. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1997;8:26–31. (In Russ.).
19. Lyakhter V.M., Prudovskii A.M. *Hydraulic modeling*. Moscow: Energoatomizdat. 1984:292. (In Russ.).
20. Chernyatevich A.G. High-temperature model-ing of the oxygen-converter process. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1991;12:16–18. (In Russ.).
21. Baptizanskii V.I., Medzhibozhskii M.Ya., Okhotskii V.B. *Converter processes for steel production*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola. 1984:344. (In Russ.).
22. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G. Model of the process of metal refining by blowing oxy-gen from above. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1972;10:61–64. (In Russ.).
23. Sizov A.M. *Gas dynamics and heat transfer of gas jets in metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya. 1987:256. (In Russ.).
24. Okhotskii V.B., Baptizanskii V.I., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A. The structure of the reaction zone when blowing metal with oxygen. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1973;8:50–53. (In Russ.).
25. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Study of the process of purging a converter bath using pho-to-film shooting. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1974;12:33–37. (In Russ.).
26. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. Observation through a transparent wall of the behavior of the converter bath during blowing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1975;2:37–42. (In Russ.).
27. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N. Macro picture of physical phenomena in the reaction zone of an oxygen converter during blowing with multi-nozzle tuyeres. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1977;12:61–65. (In Russ.).

28. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. On the mechanism of emission formation from a top-blown oxygen converter. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1976;10:54–59. (In Russ.).
29. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of the converter bath under combined blowing conditions. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1991;6:17–24. (In Russ.).
30. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. On increasing the efficiency of converter bath blow-down with afterburning of exhaust gases in the converter cavity. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1996;2:1–5.
31. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. On some features of oxidation of impurities in the converter bath during combined blowing. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1987;4:25–30.
32. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of the converter bath under combined blowing conditions. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1991; 6:17–24.
33. Development and creation of a test site for studying converter processes. Research report. Siberian Metallurgical Institute (SMI). Supervisor Protopopov E.V. Inv. No. 02920005710. Novokuznetsk. 1991:64.

Сведения об авторах:

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

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: umanskiy_aa@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Евгений Анатольевич Беленецкий, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: info@vpk-oil.ru

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

Сергей Александрович Полежаев, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, 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, 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

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Evgeny A. Belenetskii, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: info@vpk-oil.ru

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

Sergey A. Polezhaev, Master's Student at the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
Email: 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 01.04.2025
 После доработки 23.04.2025
 Принята к публикации 28.04.2025

Received 01.04.2025
 Revised 23.04.2025
 Accepted 28.04.2025