



УДК 669

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-136-142

Оригинальная статья  
Original article

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОДУВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПОГРУЖНЫМИ ГАЗОКИСЛОРОДНЫМИ ФАКЕЛАМИ

Е. В. Протопопов<sup>1</sup>, С. С. Щипанов<sup>2</sup>, Е. А. Беленецкий<sup>1</sup>, Л. П. Башченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> ПАО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

✉ protopopov\_ev@sibsiu.ru

**Аннотация.** На основании теоретических и экспериментальных исследований авторы рассматривают особенности формирования потерь металла при продувке конвертерной ванны погружными газокислородными факелами горения с использованием природного газа. Сформулированы основные подходы и концепция оборудования кислородно-топливных конвертеров для реализации процессов с элементами жидкофазного восстановления различных техногенных отходов. Причинами возможных потерь металла являются развитие процессов пылевыведения, связанных с выносом капель металла и шлака, и процессы дымовыведения при испарении веществ в высокотемпературной реакционной зоне. К основным причинам, которые вызывают повышенный угар металла, можно отнести дробление металла на капли за счет динамической энергии газовых струй с последующей эжекцией капель в струю, разбрызгивание и распыление металла пузырями СО при выходе на поверхность ванны и испарение металла в высокотемпературных реакционных зонах. Проанализированы мероприятия, позволяющие снизить потери металла при реализации кислородно-топливных процессов в конвертерах. Добавка газообразного или жидкого топлива к кислородному потоку уменьшает пылевывод от испарения железа в реакционной зоне. Этот способ достаточно легко реализуется на практике. Одновременно при такой продувке снижается влияние и других вызывающих дополнительное образование пыли факторов. При снижении температуры реакционной зоны уменьшаются проявления процесса дымовыведения.

**Ключевые слова:** конвертер, газокислородный факел, потери металла, ресурсо- и энергосберегающие технологии

**Для цитирования:** Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Беленецкий Е.А., Башченко Л.П. Закономерности определения потерь металла при продувке конвертерной ванны погружными газокислородными факелами. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(2):136–142.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-136-142>

\* По материалам XVIII Международного Конгресса сталеплавателей (г. Санкт-Петербург).

## PATTERNS OF DETERMINING METAL LOSSES DURING LANCING OF A CONVERTER BATH WITH IMMERSION OXYGEN-GAS TORCHES

E. V. Protopopov<sup>1</sup>, S. S. Shchipanov<sup>2</sup>, E. A. Belenetskii<sup>1</sup>, L. P. Bashchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 65404307, Russian Federation)

<sup>2</sup> JSC EVRAZ – United West Siberian Metallurgical Plant (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

✉ protopopov\_ev@sibsiu.ru

**Abstract.** Based on theoretical and experimental studies, the authors consider the features of the formation of metal losses during lancing of a converter bath with immersion oxygen-gas combustion torches using natural gas. The main approaches and the concept of oxygen-fuel converter equipment for the implementation of processes with elements of liquid-phase recovery of various man-made waste were formulated. The causes of possible metal losses are the development of dust release processes associated with the removal of metal and slag droplets, and smoke release processes during evaporation of substances in a high-temperature reaction zone. The main reasons that cause increased metal loss include the crushing of metal into droplets due to the dynamic energy of gas jets followed by the ejection of droplets into the jet, the splashing and spraying of metal by CO bubbles upon reaching the bath surface, and the evaporation of metal in high-temperature reaction zones. The measures allowing to reduce metal losses during the implementation of oxygen-fuel processes in converters were analyzed. The addition of gaseous or liquid fuel to the oxygen

stream reduces dust carryover from the evaporation of iron in the reaction zone. This method is quite easy to implement in practice. At the same time, such lancing reduces the influence of other factors that cause additional dust formation. With a decrease in the reaction zone temperature, the manifestations of the smoke emission process decrease.

**Keywords:** converter, oxygen-gas torch, metal losses, resource- and energy-saving technologies

**For citation:** Protopopov E.V., Shchipanov S.S., Belenetskii E.A., Bashchenko L.P. Patterns of determining metal losses during lancing of a converter bath with immersion oxygen-gas torches. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2):136–142. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-136-142>

\* Based on the Materials of the 18<sup>th</sup> International Congress of Steelmakers (Saint Petersburg).

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях повышение эффективности конвертерных процессов неразрывно связывают с проблемами разработки ресурс- и энергосберегающих технологий с использованием одновременно с ломом в качестве охладителей различных железосодержащих концентратов комплексных восстановителей, а также всевозможных техногенных отходов.

Как показывает ранее накопленный опыт [1–3] использования таких процессов с комбинированной продувкой и элементами жидкофазного восстановления в наиболее рациональном технологическом варианте при производстве полупродукта, конвертер должен быть обеспечен системами подвода к нему независимо регулируемых потоков кислорода с дожиганием отходящих газов и подачей природного и нейтрального

газов для решения различных технологических задач, и возможности подачи в расплав (см. рисунок) значительного количества дополнительных материалов и восстановителей [4–9]. Поэтому получение новой достоверной информации по формированию текущих потерь металла при плавке дополнительно обеспечит возможность принятия оптимальных технологических решений.

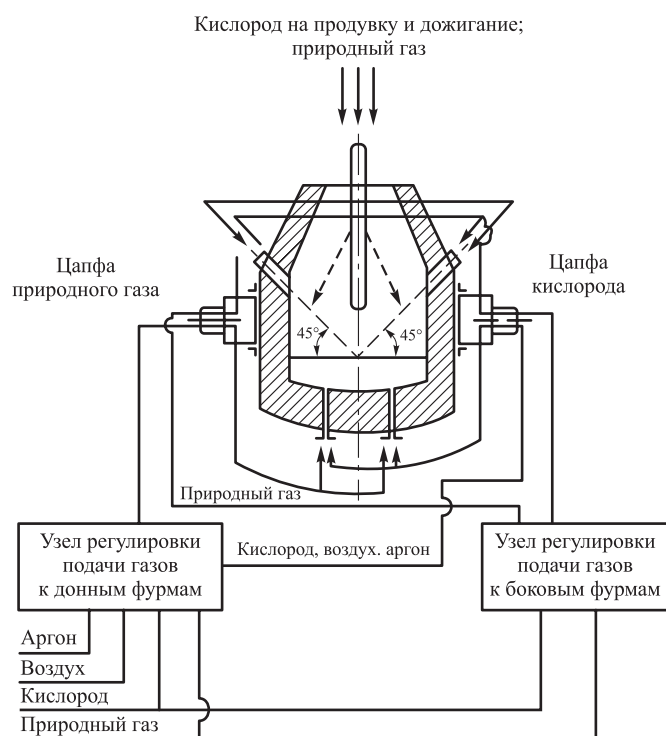
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОДУВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

При рассмотрении возможных потерь металла при продувке конвертерной ванны в рассматриваемых условиях следует различать процессы пылевыделения, связанные с выносом из конвертера отходящими газами капель металла, шлака и частиц сыпучих материалов, и дымовыделения при испарении веществ в высокотемпературных реакционных зонах с последующей частичной конденсацией паров в более «холодных» верхних горизонтах рабочего пространства [10; 11]. Интенсивное выделение бурого дыма по ходу продувки является существенной особенностью и недостатком такого процесса и в значительной степени зависит от температуры в реакционных зонах и интенсивности перемешивания ванны (потери составляют до 0,8–1,5% от массы металлозавалки). Содержание пыли в зависимости от скорости потока отходящих газов (зависит от скорости обезуглероживания) и степени вспенивания шлакометаллической эмульсии может составлять 80–120 и даже 250–350 г/м<sup>3</sup>, при этом потери железа с пылью могут достигать 0,4–1,2% [10–12].

В целом определенные на основании практических данных показатели свидетельствуют о довольно значительных потерях металла и снижении выхода жидкой стали при продувке ванны погружными струями, поэтому всегда необходим их анализ и учет [12–14].

К основным причинам, вызывающим повышенный угар металла, можно отнести:

- дробление металла на капли за счет динамической энергии газовых струй с последующей эжекцией мелких ( $10^{-3} - 10^{-5}$  м) капель в струю;
- разбрызгивание и распыление металла всплывающими пузырями CO при выходе их на поверхность ванны с учетом энергии разрыва пленки пузыря;



Кислородно-топливный конвертер для выплавки стали с элементами жидкофазного восстановления техногенных отходов

Oxygen-fuel converter for steel smelting with elements of liquid-phase recovery of man-made waste

– испарение металла в высокотемпературных реакционных зонах.

При определенных допущениях дробление металла на капли за счет динамической энергии струи можно представить как работу образования новой поверхности и выразить как

$$A = S\sigma, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поверхности раздела фаз,  $m^2$ ;  $\sigma$  – удельное поверхностное натяжение,  $эрг/м^2$  (например, при  $|C| = 1,0 \div 1,5 \%$  для железоуглеродистых расплавов в зависимости от содержания углерода можно принять  $\sigma = 1250 \cdot 10^4$   $эрг/м^2$ ) [15].

В соответствии с данными работ В.И. Баптизманского и В.Б. Охотского [10; 16], на образование новой поверхности (то есть на дробление металла и эжекцию капель в газовые струи) расходуется чуть более 1,0 % динамической энергии струи на выходе из сопла.

Тогда площадь поверхности раздела фаз составит:

$$S = \frac{A}{\sigma} = \frac{0,01E_{O_2}}{\sigma}, \quad (2)$$

где  $E_{O_2}$  – динамическая энергия струи на выходе из сопла.

Если принять скорость истечения струи из сопел Лавала порядка 350 – 450 м/с, то при расходе 1  $m^3$  кислорода может образоваться поверхность газ–металл – шлак 65 – 70 и даже 150 – 350  $m^2$  при высокой степени дробления расплава на капли [12; 16; 17].

По известному размеру пылевидных частиц можно определить их удельную поверхность [18]:

$$S_{уд} = \frac{6}{\rho_p^{Me} d}, \quad (3)$$

где  $\rho_p^{Me}$  – плотность распыленного металла;  $d$  – диаметр частиц.

Тогда при среднем размере пылевидных частиц 10 – 25  $\mu m$  удельная поверхность составит 32 – 60  $m^2/г$ , а 1  $m^3$  вдуваемого кислорода за счет распыления металла способен образовать 1,10 – 1,82  $г/м^3$  и более пыли.

В результате механического распыления металла газовыми струями выходящие из реакционных зон газы будут содержать значительное количество металлической пыли, в особенности в начальный период продувки конвертерной ванны (в условиях отсутствия слоя вспененного шлака) и в период интенсивного газовойделения при высокой скорости окисления углерода. Кроме того, в начале продувки при высоком содержании углерода поверхностное натяжение металла уменьшается, что способствует увеличению вновь образованной поверхности, то есть фактически количества уносимой пыли [15].

В таких условиях скорость истечения газовых струй, формирующихся в соплах дутьевых устройств, может

значительно превышать звуковую, что резко повышает динамическую энергию газовых струй [10]. В результате количество металла, распыленного газовыми струями, может достигать 5 – 250  $г/м^3$  отходящих газов, а при «сворачивании» шлака даже 250 – 350  $г/м^3$  [10; 19]. Борьба с этим источником пылеобразования затруднительно, так как практически во всех процессах, где применяется газовая продувка ванны, стремятся к увеличению скорости истечения окислительных струй, поскольку в этом случае значительно увеличивается степень усвоения кислорода и улучшается перемешивание ванны.

Единственным реальным техническим приемом, уменьшающим распыление металла газовой струей, является заглубливание ее в ванну. В этом случае образовавшаяся пыль может быть снова поглощена ванной, а значительная часть энергии струй использована на образование межфазной поверхности между металлом, шлаком и газом и на создание дополнительных конвективных потоков и циркуляционных зон. Примером снижения пылевыведения при заглубливании реакционной зоны в ванну может служить кислородно-конвертерный процесс с донной продувкой [20 – 22].

При продувке ванны факелами горения разбрызгивание металла будет значительно сильнее, чем при кислородной продувке вследствие вдувания большего объема газов. Возможным известным решением проблемы снижения брызгообразования может быть дополнительное перемешивание ванны при использовании механического вращения продувочных устройств или самого агрегата [10; 23 – 25]. В этом случае объем реакционной зоны будет увеличиваться в 3 – 5 раз по сравнению с обычной продувкой, а энергия струи расходоваться не на разбрызгивание расплава, а на дополнительное образование межфазной поверхности [25].

Представляет интерес оценка развития процесса распыления металла за счет всплывающих пузырей оксида углерода {CO}, который определяется прежде всего скоростью их подъема на поверхность ванны. По данным В.И. Явойского [12], скорость всплывания пузырей  $U$  может быть определена по зависимости

$$U = U_0 + \frac{m_{O_2}^2 \omega_{O_2}^2}{2mg} + \frac{V_{CO} \rho h}{m}, \quad (4)$$

где  $U_0$  – конвективная скорость металла, вызванная разностью удельных масс (эта скорость имеет малую величину и ею можно пренебречь);  $m_{O_2}$  – масса вдуваемого кислорода,  $кг/с$ ;  $\omega_{O_2}$  – скорость истечения кислорода из сопла,  $м/с$ ;  $m$  – масса металла, вовлекаемого струей в циркуляцию,  $кг$ ;  $V_{CO}$  – скорость образования CO,  $м^3/с$ ;  $\rho$  – плотность металла,  $кг/м^3$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м/с^2$ ;  $h$  – высота ванны в спокойном состоянии,  $м$ .

Расчеты показывают, что для различных вариантов конвертерного процесса величина  $U$  не будет превышать 5  $м/с$  [12; 16]. Отсюда следует, что энергия, развиваемая пузырями CO при всплывании, в сотни раз меньше энер-

гии струи ддуваемого кислорода. Следовательно можно предположить, что пузыри {CO} при выходе на поверхность образуют во столько же раз меньше пыли. Причем следует обратить внимание, что пузырь по мере всплывания под действием сил сопротивления и ферростатического давления приобретает «грибовидную» форму, а скорость всплывания пузыря такой формы может быть рассчитана по эмпирическому уравнению [26]:

$$U = \frac{R^{0,4} \sigma_{Me}}{k \rho_{Me}^{0,056} \eta_{Me}^{0,5}}, \quad (5)$$

где  $R$  – максимальный радиус пузыря, м;  $k$  – эмпирическая постоянная;  $\rho_{Me}$ ,  $\sigma_{Me}$  и  $\eta_{Me}$  – плотность, поверхностное натяжение и динамическая вязкость металла соответственно.

На интенсивное образование пыли при разрушении оболочек всплывающих пузырей также указывает ряд исследователей [19; 27], причем к основным доказательствам в данном случае можно отнести известный факт повышения интенсивности пылеобразования при увеличении скорости обезуглероживания расплава и, в целом, зависимости количества образовавшейся пыли от содержания углерода в металле. При этом энергия разрыва пузырей будет зависеть от парциального давления газа внутри них и, в соответствии с данными работы [28], в начальный момент при зарождении пузырька давление будет составлять примерно  $10^7$  Н/м<sup>2</sup>. В процессе всплывания пузыря к поверхности ванны и, соответственно, увеличении его размеров и росте давление в нем снижается и определяется давлением окружающей среды и поверхностным натяжением жидкой фазы. В соответствии с данными работы [15], величина поверхностного натяжения  $\sigma$  между газом и шлаком, например, для системы FeO–CaO–SiO<sub>2</sub> находится в диапазоне 500 – 600 мДж/м<sup>2</sup>; для металла поверхностное натяжение значительно больше, а для расплава с содержанием |C| ≈ 1 % может составлять величину порядка 1250 мДж/м<sup>2</sup>.

Таким образом, пузыри {CO} при выходе на поверхность ванны всегда будут окружены пленкой металла и, в соответствии с принятой терминологией, называются «королевками». Количество вынесенного металла, в рассматриваемом случае в виде «корольков», зависит от суммарной величины поверхности пузырей {CO} и может достигать 8 – 11 % от массы шлака [10; 11]. При этом металлическая пыль, выносимая из зоны продувки, будет содержать до 60 – 65 % чистого железа.

Образовавшиеся при разрыве пузыря частицы в зависимости от размеров могут выноситься отходящими газами в тракт либо обратно оседать в металлическую ванну. Интенсивность их возврата с достаточной степенью точности можно определить в соответствии с теорией кипящего слоя [26]. При всех прочих равных условиях эта интенсивность пропорциональна разности плотностей частицы и отходящего газа

$$\xi \equiv \sqrt{\rho_{Me} - \rho_{отх}}, \quad (6)$$

где  $\xi$  – интенсивность возврата брызг в расплав;  $\rho_{Me}$  и  $\rho_{отх}$  – плотность выносимой частицы и отходящего газа.

При этом масса частицы зависит от того, окислена она или нет, что, в свою очередь, определяется составом газовой фазы над расплавом. При достаточно высоких температурах и окислительном потенциале газовой фазы, очевидно, дополнительно протекают реакции окисления частиц со значительным уменьшением их удельного веса и, соответственно, дополнительным выносом.

Тогда, в соответствии с зависимостью (6), нежелательно допускать окисления расплывенных частиц металла, что будет в дальнейшем препятствовать оседанию их в металлическую ванну и сокращать пылевывнос. Для достижения такой цели необходимо всячески стремиться уменьшать окислительный потенциал газовой фазы, в которой при выходе на поверхность разрываются пузыри. Реализовать такой подход возможно, например, при разбавлении верхнего дутья различными видами топлива или инертным газом [29 – 31]. Ранее полученная информация по продувке металла кислородом при разбавлении азотом [29] показывает, что такой метод снижает пылевыведение пропорционально количеству введенного азота для разбавления газового потока. Однако такие методы продувки не получили широкого распространения, так как при этом уменьшаются скорости окислительных реакций и нагрева ванны. С учетом полученных сведений более приемлемым способом продувки будет являться добавка топлива к кислороду, которая наряду с уменьшением пылевыведения дополнительно вносит некоторое количество тепла в ванну [3]. Выполненные расчеты условий равновесия между металлом и газовой фазой, состоящей из стехиометрической смеси кислорода и метана, показывают, что газы, выходящие из реакционной зоны, содержат значительное количество CO и H<sub>2</sub>, в присутствии которых образование оксидов железа маловероятно или невозможно [30]. Поэтому очевидно, что дисперсные частицы металла в этих условиях будут в большей степени оседать в ванну и меньше выноситься отходящими газами.

Добавка топлива к кислороду уменьшает скорость обезуглероживания, что также способствует уменьшению количества пыли, образующейся при разрыве газовых пузырей и дроблении пленок металлических «корольков».

В соответствии с современными представлениями [10], значительное влияние на температуру реакционной зоны оказывает процесс испарения в зоне образующихся оксидов железа и марганца. При этом расход тепла, связанный с испарением, ограничивает и тормозит значительное повышение температуры реакционной зоны, а предельные значения температуры,

очевидно, определяются условиями кипения железа (2735 °С). Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что при продувке расплава технически чистым кислородом температура в области зоны взаимодействия составляет порядка 2100 – 2700 °С, а перегрев по отношению к объему продуваемой ванны – 700 – 900 °С. Такой перегрев зависит от содержания углерода в металле, скорости обезуглероживания, интенсивности продувки и поэтому изменяется по ходу конвертерной плавки [16; 32].

При учете фактора испарения железа в реакционной зоне необходимо также учитывать, что с повышением температуры упругость паров железа растет по экспоненциальному закону в соответствии с уравнением:

$$\lg P_{\text{Fe}} = \frac{18\,500}{T} + 8,025, \quad (7)$$

где  $P_{\text{Fe}}$  – упругость паров железа, мм рт. ст.

Выполненные по аналогии с работами [10; 15] расчеты показывают, что при таком перегреве реакционной зоны величина упругости паров железа не превышает 0,04 атм (30,4 мм рт. ст.), что приводит к образованию 4 – 8 г/м<sup>3</sup> пыли, то есть испарение будет приводить к значительному дополнительному пылевывосу.

Одновременно можно констатировать, что этот источник пылеобразования по своему значению близок к потерям за счет динамического воздействия струи и потерям за счет разрывающихся газовых пузырей, то есть не является, как это часто полагают, доминирующим. Этим можно объяснить и тот факт, что попытки устранить дымообразование вдуванием в реакционную зону различных охладителей хотя и уменьшают его значительно, но кардинально проблему не решают. Поэтому очевидно, что испарение в реакционной зоне не играет определяющей роли в процессе пылеобразования при продувке конвертерной ванны.

В качестве подтверждения можно привести известный факт уменьшения количества пыли в отходящих газах кислородных конвертеров на заключительном этапе продувки (в конце плавки), несмотря на то, что температура ванны в этот период значительно выше, чем в начале процесса. В то же время необходимо отметить, что испарение все же играет определенную роль в пылеобразовании, поэтому использование различных вариантов охлаждения реакционной зоны снижает дымовыделение и пылевывос при выплавке стали.

Поэтому надежным и достаточно легко реализуемым способом для снижения пылевывоса от испарения железа в реакционной зоне является добавка газообразного или жидкого топлива к кислородному потоку [3]. Такой вариант продувки будет одновременно уменьшать влияние и многих других факторов, вызывающих дополнительное образование пыли. Кроме того, ввод в конвертер совместно с кислородом топлива в газообразном или жидком виде через сверхмощные фурмы-

горелки позволяет дополнительно увеличить приход тепла в ванну.

## Выводы

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что добавка топлива в кислородные струи и реализация газокислородной продувки являются эффективными способами уменьшения пылеобразования в конвертерной плавке. Такое техническое решение позволяет снижать температуру реакционной зоны и, соответственно, процесс дымовыделения, изменяет характер окисления распыленных капель металла, способствуя коагуляции частиц и возвращению их в металлическую ванну.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Белецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;(1):102–109. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)
2. Протопопов Е.В., Шакиров К.М., Айзатулов Р.С. Обоснование некоторых параметров технологии конвертерной плавки с элементами жидкофазного восстановления. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;41(12):15–18. Protopopov E.V., Shakhirov K.M., Aizatulov R.S. Substantiation of certain parameters of converter smelting technology with liquid-phase recovery elements. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998;41(12):15–18. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)
3. Багизманский В.И., Бойченко Б.М., Черевков В.П. Тепловая работа кислородных конвертеров. Москва: Металлургия; 1988:174.
4. 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>
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.036>
6. Yusupkhodjayev A.A. Theory Waste Free Technology on the Ferrous Metallurgy. Tashkent: TSTU; 2017:4.
7. 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. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.95.306>
8. Stone R.P., Neith D., Koester S., Patterson D. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new

- technology implementation. *AISTech 2009 Proceedings*. 2009;1:737–747.
9. 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.
  10. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Киев–Донецк: Вища школа; 1984:344.
  11. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez Salgado U., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) steelmaking – reduced CO<sub>2</sub> emissions via increased scrap rate. *Metals*. 2022;12(3):466. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
  12. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. Москва: Металлургия; 1974:495.
  13. Singh A.K., Raju M.T., Jha U. Recycling of basic oxygen furnace (BOF) sludge in iron and steel works. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2011;14(1–4):19–32. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
  14. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
  15. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев–Донецк: Вища школа; 1979:277.
  16. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. Киев–Донецк: Вища школа; 1981:183.
  17. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steelmaking furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
  18. Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. Киев: Изд-во АН УССР; 1963:420.
  19. Охотский В.Б., Бутко А.В., Беда Н.И., Пудиков Д.В., Кулагин Г.Ф., Евстафьев Е.И. Динамика выноса металла из кислородного конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1974;17(6):59–62. Okhotskii V.B., Butko A.V., Beda N.I., Pudikov D.V., Kulagin G.F., Evstaf'ev E.I. Dynamics of metal removal from BOF. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974;17(6):59–62. (In Russ.).
  20. Арсентьев П.П., Квитко М.П. Конвертерный процесс с донным дутьем. Москва: Металлургия; 1983:128.
  21. Chen J.D., Zhang C.J., Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
  22. Ray S.K., Gautam Chattopadhyay G., Asim K., Ray A.K. Evaluation of dust generated from basic oxygen furnace steel making. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1997;47(6):716–721. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463929>
  23. Wang Z., Liu Q., Liu H., Wei S. A review of end-point carbon prediction for BOF steelmaking process. *High Temperature Materials and Processes*. 2020;39(1):653–662. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0098>
  24. Osani H., Ohmiya S. Total hot metals pretreatment and BOF operation. Practice for high purity steelmaking. In: *I EOS Congress*. Düsseldorf; 1993:41–46.
  25. Шиш Ю.И., Баптизманский В.И., Бейлинов М.И. и др. Об особенностях кислородно-конвертерного процесса при использовании подвижной фурмы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1972;(1):11–13. Shish Yu.I., Baptizmanskii V.I., Beilinov M.I., etc. On the features of BOF process when using a mobile tuyere. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1972;(1):11–13. (In Russ.).
  26. Касацкий А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва: Химия; 1973:752.
  27. Cao L.L., Liu Q., Wang Z., Li N. Interaction behavior between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018;45(3):239–248. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1255373>
  28. Филиппов С.И., Кольцов А.Т. Распределение парциального давления кислорода вдоль многофазного дутьевого потока кислородного конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1979;22(9):33–36. Filippov S.I., Kol'tsov A.T. Distribution of oxygen partial pressure along the multiphase blast flow of BOF. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979;22(9):33–36. (In Russ.).
  29. Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Чернятевич А.Г. Технологические аспекты комбинированной подачи нейтрального газа в конвертерную ванну. В кн.: *Труды IV Международного конгресса сталеплавыльщиков*. Москва: Черметинформация; 1997:104–107.
  30. Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А. Определение параметров окислительно-восстановительных процессов в системе Fe – O – O<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;54(8):13–18. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determining redox parameters in the Fe – O – O<sub>2</sub> – H<sub>2</sub> system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011;54(8):13–18. (In Russ.).
  31. Ростовцев С.Г. Теория металлургических процессов. Москва: Металлургиздат; 1956:516.
  32. 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;40(10):20–24. 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;40(10):20–24. (In Russ.).

### Сведения об авторах

### Information about the Authors

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

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Станислав Станиславович Щипанов**, начальник конвертерного цеха, ПАО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат»

**E-mail:** Shchipanov\_ss@sibsiu.ru

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

**E-mail:** info@vpk-oil.ru

**Людмила Петровна Бащенко**, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-1878-909X

**E-mail:** luda.baschenko@gmail.com

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

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Stanislav S. Shchipanov**, Head of the Converter Shop, JSC EVRAZ West Siberian Metallurgical Combine

**E-mail:** Shchipanov\_ss@sibsiu.ru

**Evgenii A. Belenetski**, MA Student of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

**E-mail:** info@vpk-oil.ru

**Lyudmila P. Bashchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0003-1878-909X

**E-mail:** luda.baschenko@gmail.com

### Вклад авторов

### Contribution of the Authors

**Е. В. Протопопов** – постановка цели и задач исследования, обоснование направления исследований, обобщение и анализ полученных результатов, написание основного текста статьи.

**С. С. Щипанов** – постановка задач исследования, анализ полученных результатов.

**Е. А. Беленецкий** – анализ полученных результатов.

**Л. П. Бащенко** – обобщение и анализ полученных результатов, анализ литературных источников.

**E. V. Protopopov** – setting the goals and objectives of the study, substantiating the direction of research, generalization and analysis of results, writing the text.

**S. S. Shchipanov** – formulation of research objectives, analysis of results.

**E. A. Belenetski** – analysis of results.

**L. P. Bashchenko** – generalization and analysis of results, literary analysis.

Поступила в редакцию 01.12.2025

После доработки 25.12.2025

Принята к публикации 12.01.2026

Received 01.12.2025

Revised 25.12.2025

Accepted 12.01.2026