

Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ
ФАКЕЛОВ С РАСПЛАВОМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ КОНВЕРТЕРОВ**

© 2026 г. Е. В. Протопопов, Е. А. Беленецкий, Н. Ф. Якушевич, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Современные тенденции в конвертерном производстве стали характеризуются активным внедрением ресурсо- и энергосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности металлургических процессов. Проанализированы перспективные методы выплавки стали с получением металлического полупродукта непосредственно в конвертере, а также рассмотрены технологические решения по утилизации техногенных отходов. Особое внимание уделено опыту применения комбинированной продувки, которая значительно расширяет функциональные возможности агрегатов за счет использования новых композитных материалов на основе промышленных отходов. Показано, что внедрение таких технологий способствует не только снижению себестоимости производства, но и повышению экологической безопасности металлургических предприятий. В работе обосновывается необходимость разработки новых компоновок оборудования и технологических решений, включая предварительный подогрев лома и других шихтовых материалов, а также методы интенсификации дожига CO для оптимизации энергопотребления. Представлены ключевые аспекты повышения технико-экономических показателей плавки за счет рационального использования вторичных ресурсов и внедрения инновационных подходов к управлению процессом. Проведенный термодинамический анализ показал, что применение факельного горения в рабочем пространстве конвертера существенно изменяет состав газовой фазы. Помимо традиционных компонентов (O_2 , CO, CO_2), в системе появляются H_2 и H_2O , что приводит к изменению окислительной способности газовой фазы; модификации теплового режима процесса. Оптимизация состава газокислородного топлива должна учитывать выявленные термодинамические закономерности для обеспечения эффективного протекания металлургических процессов.

Ключевые слова: конвертерная плавка, комбинированная продувка, техногенные отходы, ресурсосбережение, энергоэффективность, предварительный подогрев лома, интенсификация процессов

Для цитирования: Протопопов Е.В., Беленецкий Е.А., Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М. Исследование процессов взаимодействия газокислородных факелов с расплавом в рабочем пространстве конвертеров. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2026;1(55):103–113. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-103-113](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113)

Original article

**INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF OXYGEN GAS FLARES
WITH MELT IN THE WORKING SPACE OF CONVERTERS**

© 2026 E. V. Protopopov, E. A. Belenetsky, N. F. Yakushevich, E. M. Zapolskaya

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

Abstract. Current trends in converter steel production are characterized by the active introduction of resource- and energy-saving technologies aimed at improving the efficiency of metallurgical processes. Promising methods of steel smelting to produce a metal intermediate directly in a converter are analyzed, and technological solutions for the disposal of man-made waste are considered. Special attention is paid to the experience of using combined purging, which significantly expands the functionality of the units through the use of new composite materials based on

industrial waste. It is shown that the introduction of such technologies contributes not only to reducing the cost of production, but also to improving the environmental safety of metallurgical enterprises. The paper substantiates the need to develop new equipment upgrades and technological solutions, including preheating scrap and other charge materials, as well as methods for intensifying CO afterburning to optimize energy consumption. The key aspects of improving the technical and economic performance of smelting through the rational use of secondary resources and the introduction of innovative approaches to process management are presented. The thermodynamic analysis showed that the use of flare combustion in the working space of the converter significantly changes the composition of the gas phase. In addition to the traditional components (O_2 , CO, CO_2), H_2 and H_2O appear in the system, which leads to a change in the oxidizing ability of the gas phase; modification of the thermal regime of the process. Optimization of the composition of oxygen gas fuel should take into account the revealed thermodynamic patterns to ensure the efficient flow of metallurgical processes.

Keywords: converter melting, combined purging, man-made waste, resource conservation, energy efficiency, preheating of scrap, intensification of processes

For citation: Protopopov E.V., Belenetsky E.A., Yakushevich N.F., Zapolskaya E.M. Investigation of the processes of interaction of oxygen gas flares with melt in the working space of converters. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):103–113. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-103-113](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113)

Введение

За последние годы основные подходы к определению оптимальных условий выплавки стали в конвертерах существенно изменились в связи с реализацией технологических вариантов плавки с получением в агрегате металлического полупродукта и поисках технических решений по ресурсо- и энергосбережению при переработке различных техногенных отходов. В тоже время, накопленный опыт использования в отечественной отрасли и за рубежом комбинированной продувки в конвертерах позволили существенно расширить функциональные возможности процесса с точки зрения применения различных новых комплексных материалов на основе техногенных отходов, что будет способствовать повышению технико-экономических показателей плавки [1 – 5].

С целью оптимизации характеристик рассматриваемых процессов должны быть созданы новые компоновки оборудования агрегатов и технологических мероприятий, обеспечивающих в том числе предварительный подогрев лома и других шихтовых материалов, интенсификацию дожигания отходящих газов и окислительно-восстановительных процессов в жидкой ванне при сохранении стойкости дутьевых устройств и футеровки конвертеров (рис. 1).

Для решения таких многоцелевых технологических задач в каждом из возможных вариантов процесса широко используются высокотемпературные разноимпульсные газовые струи и газокислородные факелы горения [6 – 9]. Поэтому важным представляется изучение и оценка вклада факелов горения в окислительно-восстановительные процессы в барботируемой конвертерной ванне.

Сжигание газообразного топлива в рабочем пространстве конвертера при формировании по-

гружных факелов горения будет значительно изменять общую гидродинамическую картину в реакционных зонах и жидкой ванне. Необходимо учитывать, что в газокислородных струях сложной структуры при формировании и по ходу течения в рабочем пространстве будут изменяться температура, объем и состав газа. При этом объем выделяющихся газов будет изменяться не только из-за роста температуры, но и в результате химических реакций, которые могут протекать как с увеличением, так и с уменьшением объема реагирующих фаз и системы в целом.

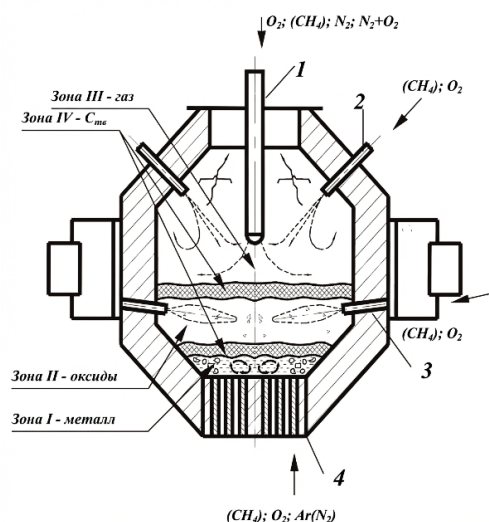


Рис. 1. Схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением техногенных отходов:

1 – дутьевая фурма; 2 и 3 – газокислородные горелки при формировании факелов в рабочем пространстве и под уровень расплава; 4 – донные фурмы;

I – IV – выделенные зоны взаимодействия фаз

Fig. 1. Schemes of the converter process by liquid-phase recovery of man-made waste:

1 – blast tuyeres; 2 and 3 – gas-oxygen burners when forming torches in the working space and under the melt level;

4 – bottom tuyeres; I – IV – selected zones of phase interaction

Методы и результаты исследований

Динамика процессов горения газообразного топлива и окисления элементов в конвертерной ванне при взаимодействии с высокотемпературными продуктами сгорания может быть определена известными термодинамическими методами [10 – 12], а расчеты процессов взаимодействия факелов с химическими элементами металлического расплава с определенными допущениями могут быть проведены для равновесных условий. В реальных условиях конвертерной плавки достижение равновесия отдельных реакций и всей системы в целом практически невозможны, однако такие расчеты могут обеспечить возможность выявления наиболее существенных взаимосвязей в поведении элементов расплава и установить направление реакций в процессах окисления – восстановления дополнительных присадок и примесей металлозавалки.

Схема взаимодействий компонентов при сжигании газообразного углеводородного топлива в рабочем пространстве конвертера может быть представлена при анализе диаграммы состояния системы C – H₂ – O₂ (рис. 2), которая позволяет количественно оценить состав продуктов реакций на разных этапах процесса горения [10].

На диаграмме можно выделить три характерных области. Поле области H₂ – H₂O – CO₂ – CO будет соответствовать четырехкомпонентным составам смесей продуктов окисления (CO + CO₂ + H₂O + H₂) исходных углеводородных смесей C_nH_m + H₂ + C и дополнительно присутствующему молекулярному кислороду (P_{O₂} = 10⁻⁹ ÷ 10⁻¹⁸ атм.). Выше этой области расположено поле составов газов, состоящих из продуктов сжигания (CO₂, H₂O и O₂), а ниже – поле восстановительных газовых смесей, состоящих из CO, H₂ недоокисленных углеводородов и твердого углерода.

При сжигании метана CH₄ и использовании в качестве окислителя кислородных смесей, выделенный участок будет расположен на соединительной линии CH₄ – O₂. При сжигании других газов (например, ацетилена C₂H₂) кривая будет расположена соответственно на линии C₂H₂ – O₂ или других смесей окислителя и углеводородов.

В реальных условиях окисление природного газа, состоящего, в основном, из метана, будет осуществляться в две стадии. На первой стадии при температурах 1146 – 1746 К происходит конверсия углеводородов по реакции

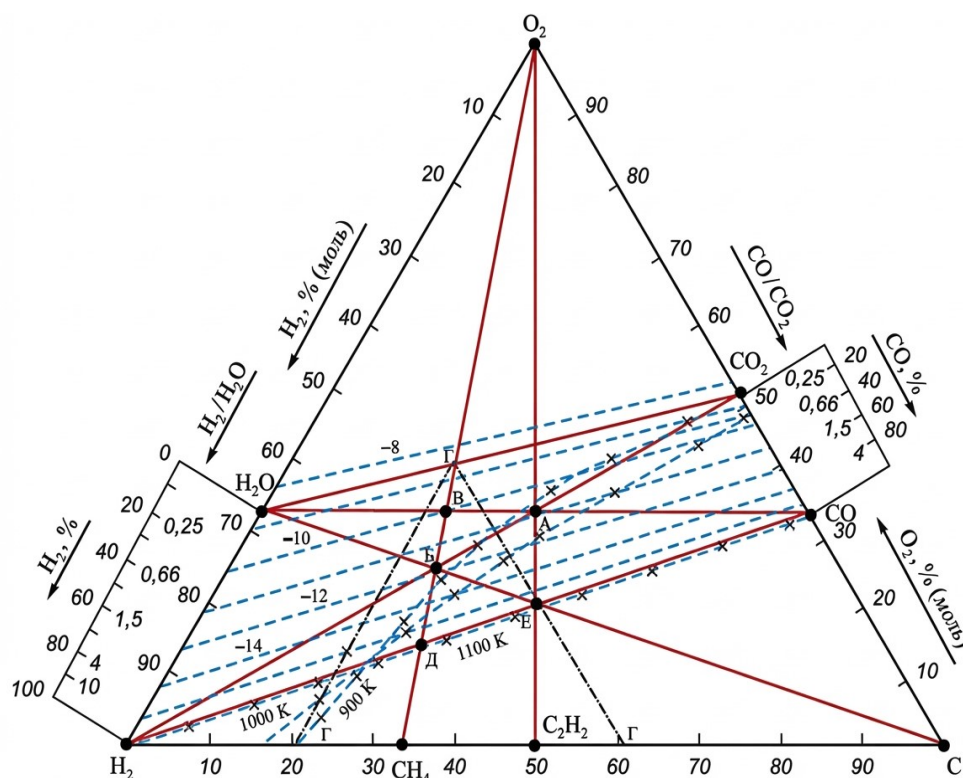
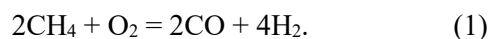


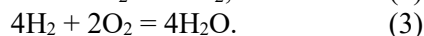
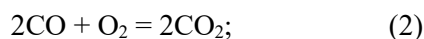
Рис. 2. Диаграмма состояния системы C – H₂ – O₂:

--x-- -- изотермическая граница области углеродоотложения при температуре 1100, 1000 и 900 К;
 - - - - - линии постоянных значений lgP_{O₂} при 1100 К

Fig. 2. Diagram of the state of the C – H₂ – O₂ system:

--x-- -- isothermal boundary of the carbon deposition region at a temperature of 1100, 1000 and 900 К;
 - - - - - lines of constant lgP_{O₂} values at 1100 К

На второй стадии происходит дожигание оксида углерода и водорода по реакциям



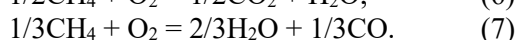
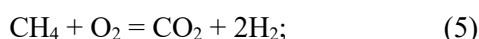
Тогда сжигание газа в факелах горения может быть описано суммирующей реакцией:



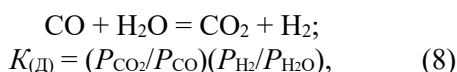
где $\Delta G^\circ_{(4)1650 \text{ К}} = -377\,907 \text{ Дж/моль O}_2$; $\Delta G^\circ_{(4)2000 \text{ К}} = -355\,975 \text{ Дж/моль O}_2$.

В рассматриваемом случае и далее для получения корректных сравнительных оценок все реакции приведены к 1 моль O_2 .

Количество и состав продуктов реакции будут зависеть в первую очередь от количества кислорода в газокислородной смеси (рис. 2). При отсутствии углерода и недостатке кислорода, например, если состав газокислородной смеси соответствует точке *Д* (27 % С, 58 % H_2 , 14,5 % O_2), лежащей на пересечении линий $\text{CH}_4 - \text{O}_2$ и $\text{H}_2 - \text{CO}$, соответствующую содержанию 16,8 % O_2 от количества метана, происходит конверсия газа по реакции (1). При этом в качестве продуктов реакции будут образовываться H_2 и CO в соотношении, равным длинам отрезков $(\text{CO} - \text{Д}):(\text{H}_2 - \text{Д})$ или (56,8 % H_2):(43,2 % CO). Тогда при увеличении содержания кислорода в газокислородной смеси до 25 % (точка *Б*) окисление метана будет осуществляться по следующим реакциям параллельно с протеканием реакции (1) (рис. 2):



Состав продуктов реакции в области $\text{H}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CO}$ и, соответственно, соотношение степени протекания реакций (1), (4) – (7) будет контролироваться константой равновесия K реакции водяного газа:



где P – равновесные парциальные давления газов, МПа.

Кроме того, для газовых смесей с высокой концентрацией CO указанное выше отношение также будет контролироваться константой равновесия реакции:



протекающей с выделением сажистого углерода [10].

Причем при низких температурах рабочего пространства (менее 1100 К) зона выделения углерода уже в значительной степени будет совмещаться с областью существования многокомпонентной газовой смеси $\text{H}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CO}$. Тогда при температурах выше 1100 К твердый углерод может присутствовать только в поле $\text{H}_2 - \text{C} - \text{CO}$, а при повышении концентрации H_2O возможно развитие реакции



Универсальной характеристикой состояния газовой фазы является парциальное давление кислорода P_{O_2} , которое может быть определено из констант равновесия реакций (2) и (3):

$$K_{(2)} = \frac{P_{\text{CO}_2}^2}{P_{\text{O}_2} P_{\text{CO}}^2}; \quad (11)$$

$$P_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}^2}{K_{(2)} P_{\text{CO}}^2}; \quad (12)$$

$$K_{(3)} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}^4}{P_{\text{H}_2}^4 P_{\text{O}_2}^2}; \quad (13)$$

$$P_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}^2}{P_{\text{H}_2}^2 K_{(3)}^{1/2}}. \quad (14)$$

Таким образом, термодинамические параметры газовых реакций могут характеризоваться значениями $\Delta G^\circ = f(T) = -P \ln K_P$ или отношением равновесных парциальных давлений $\frac{P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2}}$ или $\frac{P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}$.

При анализе видно (рис. 2), что при полном сгорании метана до CO_2 и H_2O по реакции (4) необходимо, чтобы исходная газокислородная смесь соответствовала по составу точке *Г* $\frac{\text{O}_2}{\text{CH}_4} = \frac{\Gamma - \text{CH}_4}{\Gamma - \text{O}_2} = 0,6$, то есть в смеси должно присутствовать 40,9 % O_2 и 59,1 % CH_4 (смесь по составу должна соответствовать 100 % CH_4 и 69 % O_2 , при этом будет образовываться газовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O).

При меньшем количестве кислорода будет происходить неполное сгорание CO и H_2 (на второй стадии процесса), то есть в газовой фазе, кроме CO_2 и H_2O , будут также присутствовать H_2 и CO . При большем количестве кислорода в продуктах реакции дополнительно будет находиться и свободный кислород. Причем в обоих случаях полная энтальпия процесса будет снижаться: в первом случае за счет неполного протекания экзотермических реакций окисления водорода H_2 и оксида углерода CO , а во втором – за счет нагрева избыточного кислорода. В последнем варианте избыточный кислород можно полезно использовать как тепловой балласт при необходимости

снижения температуры факелов горения, например, при подаче через боковые фурмы (рис. 1).

Показатели равновесных процессов окисления метана кислородом, оксидом углерода CO₂ и водяным паром при температурах конвертерной ванны (1800 – 2200 К) приведены в таблице, где J – полная энтальпия конечных продуктов, отнесенная к 1 молю исходных реагентов, Дж/моль; γ_{CO}^C – степень превращения углерода исходных реагентов в CO; $\gamma_{H_2}^H$ – степень превращения водорода исходных реагентов в молекулярный водород; $\gamma_{CO_2}^C$ – степень превращения углерода исходных реагентов в CO₂; $\gamma_{H_2O}^H$ – степень превращения водорода исходных реагентов в H₂O; J' – полная энтальпия исходных реагентов, Дж/моль; $\alpha_{CO + H_2}$ – затраты энергии, отнесенные к 1 м³ CO + H₂, кДж/м³; $\alpha_{O_2 + CO_2}$ (или H₂O) – затраты энергии, отнесенные к единице исходных реагентов (O₂ + CO₂ + H₂O), кДж/м³ (кДж/кг).

Следует отметить, что в рабочем пространстве конвертера в процессе окисления метана кислородом одновременно протекают все реакции, в том числе и реакции (8), (9), контролирующие в целом состав газовой фазы. В результате степень превращения углерода метана CH₄ в твердый углерод и водорода в H₂O при низких температурах (1100 – 1200 К) и давлении $P = 0,1$ МПа невелика. В

тоже время при температурах конвертерной ванны 1600 – 2600 К степень конверсии метана до CO и H₂ будет достигать практически 100 % при соотношении CH₄ + 0,5O₂ и незначительно уменьшаться при увеличении концентрации кислорода в смеси до соотношения CH₄ + 2O₂ и повышении давления до 0,3 МПа (см. таблицу).

Как показывает выполненный термодинамический анализ [11] в области высоких температур 1200 – 2800 К при соотношении C/O = 1 в конечных продуктах присутствуют, в основном, молекулярный водород и оксид углерода (H₂ + CO). Концентрации CO и H₂ будут зависеть от исходного соотношения элементов в системе C – H – O и могут при C/O = 1 с достаточной точностью определяться из известных выражений [12 – 15]

$$N_{CO} = \frac{2\left(\frac{C}{H}\right)}{1 + \left(\frac{C}{H}\right)}, \text{ моль}; \quad (15)$$

$$N_{CO_2} = \frac{2\left(\frac{C}{H}\right)}{1 + 2\left(\frac{C}{H}\right)}, \text{ моль}; \quad (16)$$

В тоже время при низких температурах в составе равновесных продуктов будут присутствовать также CH₄, CO₂, H₂O и конденсированный углерод C_к. Причем степень превращения углерода

Показатели равновесных процессов окисления метана кислородом, оксидом углерода CO₂ и водяным паром H₂O ($P = 100$ кПа)

Indicators of equilibrium processes of methane oxidation by oxygen, carbon monoxide CO₂ and water vapor H₂O ($P = 100$ kPa)

Показатель	Значение показателя							
	CH ₄ + 0,5O ₂		CH ₄ + 2O ₂		CH ₄ + CO ₂		CH ₄ + H ₂ O	
	1600 К	2200 К	1800 К	2200 К	1800 К	2200 К	1800 К	2200 К
Состав продуктов, моль · Дж C:O = 1, H:C = 4	C/O = 1	H/O = 4	C/O=0,25	H/O = 1	C/O = 1	H/O = 2	C/O = 1	H/O = 6
H ₂	0,6660	0,6628	0,0010	0,0070	0,4996	0,4970	0,7495	0,7457
CH ₄	0,0002	–	–	–	0,0001	–	0,0002	–
H ₂ O	0,0001	–	0,6644	0,6467	0,0001	–	0,0001	–
CO	0,3332	0,3326	0,0019	0,0179	0,4999	0,4990	0,2499	0,2494
CO ₂	–	–	0,3309	0,3106	–	–	–	–
O ₂	–	–	0,0013	0,0109	–	–	–	–
ΣH	1,3340	1,3300	1,3310	1,3140	1,0000	0,9981	1,5000	1,4960
J	+10624	+25545	–232555	–191046	–7253	+7707	+19565	+34455
γ_{CO}^C	0,99860	0,99990	0,00565	0,05457	0,99970	0,99990	0,99930	0,99980
$\gamma_{H_2}^H$	0,998300	0,999100	0,001473	0,010650	0,999900	0,995800	0,999200	0,996600
$\gamma_{CO_2}^C$	0,000052	0,000100	0,994300	0,945400	0,000053	0,000010	0,000480	0,000009
$\gamma_{H_2O}^H$	0,002010	0,000052	0,998100	0,984300	0,000202	0,000053	0,000189	0,000048
J'	+21240	+51200	–222900	–19390	–14500	+15440	+39120	+69070
$\alpha_{CO + H_2}$	1586	2260	308400	29820	4905	5582	4409	5087
$\alpha_{O_2 + CO_2}$	9511	13520	–13260	–11310	19610	22280	–	–

метана в оксид углерода (γ_{CO}^C) и степень превращения водорода метана в молекулярный водород ($\gamma_{H_2}^H$) при $C/O = 1$ и $T = 1500 \div 2500$ К составляют примерно 100 % [13; 15].

Повышение давления и увеличение соотношения C/H расширяют область существования конденсированного углерода (γ_C), которая сужается при росте соотношения O/C в системе.

При конверсии метана оксидом углерода CO степень превращения углерода в CO (γ_{CO}^C) при температурах конвертерной плавки будет снижаться до 0,6, а степень окисления водорода до H_2O возрастать до 0,95 и при конверсии парами воды, наоборот, уменьшаться до 0,7 (см. таблицу).

Таким образом, использование факелов горения изменяет состав газовой фазы в рабочем пространстве конвертера, в которой, кроме традиционно присутствующих при продувке кислородом газов O_2 , CO, CO_2 , появляются H_2 и H_2O . Причем присутствие этих газов будет изменять тепловой режим процесса и окислительную способность газовой фазы в целом.

Тогда при сжигании газокислородного топлива оптимальный состав исходной газовой смеси (природный газ и кислород) должен соответствовать составу 100 % CH_4 и 69 % O_2 , при этом в качестве продукта реакций окисления образуется парогазовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O . Причем только при окислении метана кислородом может быть достигнута температура факела более 1800 К, а использование в качестве окислителя воздуха, углекислого газа или паров воды не будет обеспечивать получение необходимого теплового эффекта.

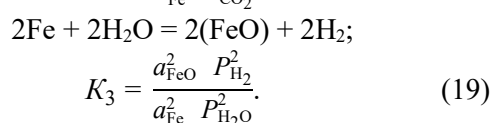
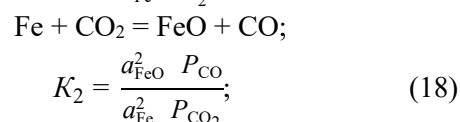
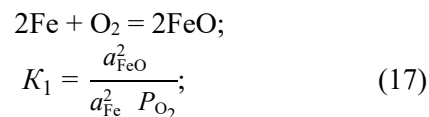
Решение различных технологических задач в конвертерах, как правило, связывают с использованием многоцелевых дутьевых устройств и различных технологических газов, поэтому совершенно очевидно, что для данных условий из факелов горения в газовую фазу на различных этапах процесса также будут поступать пары воды и углекислый газ.

В рабочем пространстве агрегата при взаимодействии факелов с расплавом, подаваемый через горелки кислород, природный газ и продуваемый через основную фурму кислород также будут активно взаимодействовать с барботируемой шлакометаллической ванной [3; 16 – 18], в результате чего будут протекать процессы окисления – восстановления примесей металлозавалки – углерода, марганца, кремния, фосфора и железа

В дальнейшем при разработке и технологических положениях конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением железосодержащих

отходов проанализировали характеристики и поведение основных с точки зрения значимости для технологии химических элементов – железа и углерода.

Тогда возможные варианты развития окисления железа будут осуществляться по следующим реакциям [3; 15]:



При известных значениях активностей a_{Fe} и a_{FeO} равновесие представленных реакций может однозначно характеризоваться составом газовой фазы, выраженным отношениями P_{CO}/P_{CO_2} , P_{H_2}/P_{H_2O} или более универсальной характеристикой – парциальным давлением кислорода P_{O_2} . Такой подход позволяет сопоставлять вероятность преимущественного протекания реакций окислительно-восстановительных процессов, в том числе при изменении составов газовой и конденсированных фаз. На рис. 3 представлена диаграмма зависимости значений $\Delta G^\circ = f(T)$ для газообразных и некоторых конденсированных оксидов (например, FeO), равновесие которых характеризуется значениями P_{CO}/P_{CO_2} , P_{H_2}/P_{H_2O} и P_{O_2} , каждое из которых представлено на отдельной шкале, рассчитанной по константам равновесия достаточно хорошо изученных «газовых реакций» [10, 15].

Пересечение линеаризованных зависимостей $\Delta G^\circ = f(T)$ для реакций взаимодействия восстановителей (C, H, CO, Me) с кислородом позволяет оценить при заданных условиях равновесный состав газовой фазы (P_{CO}/P_{CO_2} , P_{H_2}/P_{H_2O} и P_{O_2}) и возможность протекания той или иной реакции (рис. 3).

Исходные координаты точек C, O, H, CO на шкале ΔG° при 0 К были получены путем экстраполяции значений $\Delta G^\circ = f(T)$ для газовых реакций на нулевые значения температур.

При окислении чистого железа с образованием оксидных фаз, насыщенных оксидом железа FeO, можно принять, что $a_{Fe} = 1$ и $a_{FeO} = 1$.

В этом случае равновесие реакции (17) при температуре плавления железа (точка K на линии) характеризуется параметрами $T = 1808$ К, $P_{O_2} \approx 9 \cdot 10^{-9}$ (точка K' на шкале P_{O_2}).

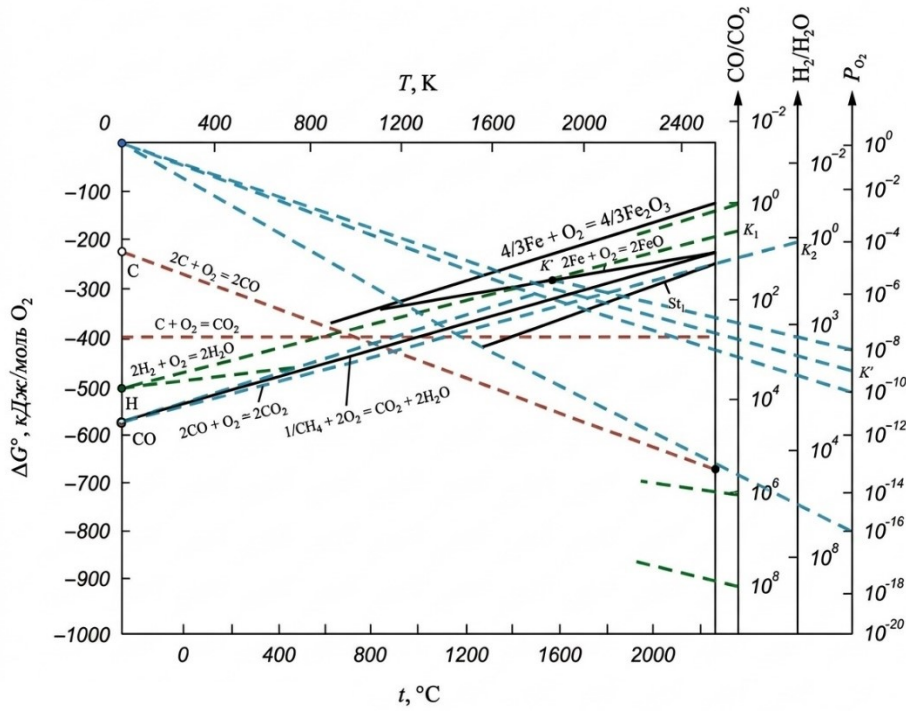


Рис. 3. Диаграмма $\Delta G^\circ = f(T)$ реакций образования оксидов
 Fig. 3. Diagram $\Delta G^\circ = f(T)$ of reactions of formation of oxides

При небольшом (до 5 %) содержании примесей в металлическом расплаве активность железа при изменении температуры и концентрации примесей меняется незначительно. Так, например, при $T = 1600$ К и изменении концентрации углерода в металле от 3 до 4 % (область гомогенных расплавов) величина $\alpha_{Fe} = 0,80 \div 0,73$; при 1800 К и концентрации углерода менее 3 % – $\alpha_{Fe} = 0,99 \div 0,85$ %, а при 1973 К – $\alpha_{Fe} = 1 \div 0,86$ (рис. 3).

Активности оксида железа FeO в оксидных расплавах системы FeO – CaO – SiO₂ – MgO, соответствующих по составу 15–30 % FeO, 20–30 % SiO₂, в зависимости от состава и температуры при 1800 – 1900 К находятся в пределах 0,25 – 0,40 [19; 20].

Параметры окисления железа в расплаве, рассчитанные с учетом изменения активностей α_{Fe} и α_{FeO} , изменяются незначительно в основном в области низких температур (менее 1550 °С).

При окислении железа продуктами окисления метана (H₂O и CO₂) по реакциям (18) и (19) точка равновесных параметров K смещается в K_1 для реакции (18) ($P_{O_2} = 9 \cdot 10^{-10}$, CO/CO₂ ≈ 4) и в K_2 для реакции (19) ($H_2/H_2O \approx 1$).

Таким образом, окисление железа возможно кислородом ($P_{O_2} = 10^{-11} \div 10^{-6}$), менее интенсивное окисление углекислым газом CO₂ ($P_{O_2} = 10^{-4} \div 10^{-2}$). Окисление железа парами воды при температурах конвертерной плавки практически невозможно.

При анализе процесса окисления углерода в рассматриваемых условиях следует отметить следующее.

Сжигание газообразного топлива в факелах горения описывается реакцией

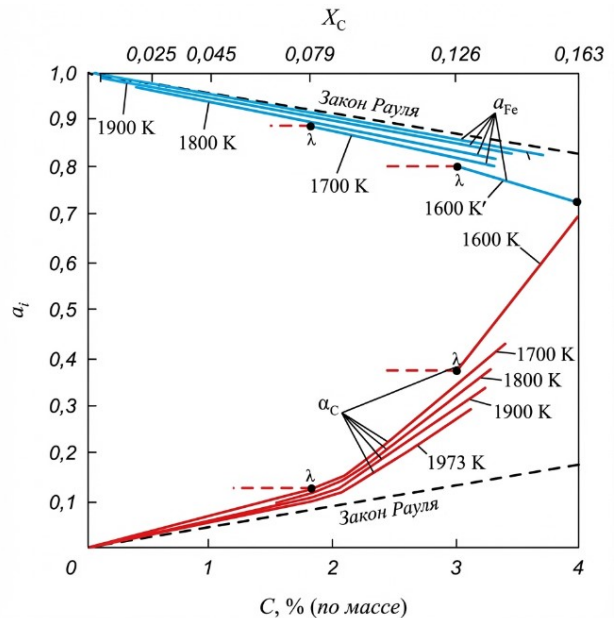
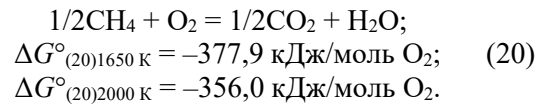


Рис. 4. Зависимость активностей железа и углерода в Fe – C расплавах от температуры и концентрации углерода:
 ● – граница двухфазных равновесий γ -Fe + X_C (ликвидус)
 Fig. 4. Dependence of iron and carbon activities in Fe – C melts on temperature and carbon concentration:
 ● – is the boundary of two-phase equilibria γ -Fe + X_C (liquidus)

Энергия Гиббса для этой реакции меньше, чем для реакции окисления твердого углерода до CO и CO₂ [21]:

$$2C + O_2 = 2CO; \quad (21)$$

$$\Delta G^{\circ}_{(21)} = -235\,977 - 168,7T \text{ кДж/моль } O_2;$$

$$C + O_2 = CO_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(22)} = -397\,480 + 0,75T \text{ кДж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(21)1800 \text{ К}} = -569,6 \text{ кДж/моль } O_2; \quad (22)$$

$$\Delta G^{\circ}_{(21)2000 \text{ К}} = -573,4 \text{ кДж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(22)1800 \text{ К}} = -396,1 \text{ кДж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(22)2000 \text{ К}} = -396,0 \text{ кДж/моль } O_2.$$

Такой анализ показывает [20], что присутствие твердого углерода (пылеугольного топлива или порошкообразного теплоносителя) в факелах горения может управлять и интенсифицировать процесс горения, причем наиболее эффективен процесс при окислении углерода до CO, то есть при коэффициенте избытка кислорода менее 1,0. При этом равновесные значения P_{O_2} будут находиться в пределах $10^{-15} \div 10^{-18}$, а $P_{CO}/P_{CO_2} > 10^4$.

При окислении углерода в расплаве при изменении активности углерода в зависимости от его концентрации и температуры от 0,65 до 0,30 ($C = 4 \%$, $T = 1473 \div 2273 \text{ К}$) и до 0,010 – 0,001 ($C = 0,1 \%$, $T = 1873 \div 2073 \text{ К}$) условия окисления углерода значительно изменяются.

В качестве окислителей углерода расплава могут выступать кислород, подаваемый на продувку, продукты окисления метана (CO₂ и H₂O) и оксиды железа окисленного шлака (см. таблицу) при взаимодействии углерода металла с кислородом по реакции (21):

$$K_{21} = P_{CO}^2 a_C^{-2} P_{O_2}^{-1},$$

при температурах 1723 – 2273 К, $P_{O_2} = 10^{-17} \div 10^{-13}$.

Окислению углерода металла оксидом углерода CO₂ по реакции

$$C + CO_2 = 2CO; \quad (23)$$

$$\Delta G^{\circ}_{(23)} = -170\,780 - 176,56T \text{ кДж/моль } O_2;$$

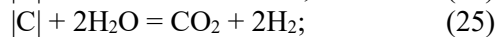
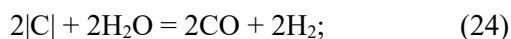
$$K_{(23)} = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2} a_{|C|}};$$

$$\Delta G^{\circ}_{(23)1800 \text{ К}} = -485\,024 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(23)2000 \text{ К}} = -519\,940 \text{ Дж/моль } O_2.$$

Рассматривая реальный процесс последовательно получим для начальной стадии плавки (после заливки чугуна) при температуре $T \approx 1600 \text{ К}$; $|C| = 3,2 \%$; $\alpha_C = 0,35$; $P_{CO}/P_{CO_2} = 3,4 \cdot 10^3$; в конце плавки при $T = 1900 \text{ К}$, $|C| = 0,5 \%$, $\alpha_C = 0,3$, $P_{CO}/P_{CO_2} = 2,5 \cdot 10^4$. Причем равновесное значение P_{O_2} в начале плавки будет составлять примерно $P_{O_2} \approx 10^{-16}$ и на заключительном этапе плавки $P_{O_2} \approx 10^{-11}$.

При окислении углерода парами воды по реакциям



$$\Delta G^{\circ}_{(24)1800 \text{ К}} = -245\,768 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(24)2000 \text{ К}} = -302\,820 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(25)1800 \text{ К}} = -249\,408 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(25)2000 \text{ К}} = -277\,150 \text{ Дж/моль } O_2.$$

$$K_{(24)} = \frac{P_{H_2}^2 P_{CO}^2}{P_{H_2O}^2 a_{|C|}};$$

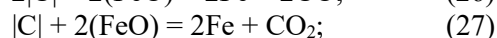
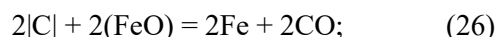
$$K_{(25)} = \frac{P_{H_2}^2 P_{CO_2}^2}{P_{H_2O}^2 a_{|C|}}.$$

Для реакции (24) при $|C| = 3 \%$ и $T = 1800 \text{ К}$, $\Delta G^{\circ} = -30\,206 \text{ Дж}$, при 2000 К $\Delta G^{\circ} = -20\,470 \text{ Дж}$; при $C = 1,0 \%$ $\Delta G^{\circ}_{(24)1800} = -1228 \text{ Дж}$ и $\Delta G^{\circ}_{(24)2000} = -916,3 \text{ Дж}$ соответственно, а при $|C| = 0,1 \%$ $\Delta G^{\circ}_{(24)1800} = -30 \text{ Дж/моль}$ и $\Delta G^{\circ}_{(24)2000} = -6,1 \text{ Дж/моль}$.

Для реакции (25) получим при $|C| = 3 \%$ и $T = 1800 \text{ К}$, $\Delta G^{\circ}_{(25)1800} = -249\,408 \text{ Дж}$, при $T = 2000 \text{ К}$ $\Delta G^{\circ}_{(25)2000} = -277\,150 \text{ Дж}$; при $|C| = 1 \%$ $\Delta G^{\circ} = -14\,966 \text{ Дж}$, а при $|C| = 0,1 \%$, $\Delta G^{\circ}_{(25)1800} = -1247 \text{ Дж}$ и $\Delta G^{\circ}_{(25)2000} = -2771 \text{ Дж}$.

Таким образом, по ходу продувки окисление углерода металла газообразными окислителями осуществляется преимущественно кислородом, в меньшей степени оксидом углерода CO₂ ($P_{O_2(22)} = 10^{-17} \div 10^{-13}$; $P_{O_2(23)} = 10^{-16} \div 10^{-11}$; $CO/CO_2 = 2,5 \cdot 10^4$) и в очень незначительной степени возможно при низких температурах и высоких концентрациях углерода парами воды H₂O (при значениях P_{H_2}/P_{H_2O} менее 10^{-3}).

Рассматривая окисление углерода оксидами железа (FeO), находящимися в шлаковом расплаве возможно окисление по реакциям



$$\Delta G^{\circ}_{(26)1800 \text{ К}} = -193\,184 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\Delta G^{\circ}_{(26)2000 \text{ К}} = -319\,708 \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\lg K_{(26)1800} = 5,6;$$

$$\lg K_{(27)2000} = 9,28;$$

$$K_{(26)} = \frac{a_{(Fe)} P_{CO}^2}{a_{(FeO)}^2 a_{|C|}};$$

$$K_{(27)} = \frac{a_{(Fe)}^2 P_{CO}^2}{a_{(FeO)}^2 a_{|C|}}.$$

При $T = 1800 \text{ К}$ и содержании углерода в металле 3% ($\alpha_C = 0,8$; $\alpha_{Fe} = 0,32$) равновесные значения должны составлять $P_{CO(27)1800 \text{ К}} = K_{(27)1800 \text{ К}} \alpha_C \alpha_{FeO} \times \alpha_{Fe}^{-1} = 7,635$; $P_{CO_2 1800 \text{ К}} = K_{(11)1800 \text{ К}} = 4,78 \cdot 10^8$; при $T = 2000 \text{ К}$

$(a_C = 0,25; a_{Fe} = 0,81; a_{FeO} = 0,4) P_{CO(27)2000K} = 5,4 \cdot 10^3$;
 $P_{CO_2 2000K} = 2,3 \cdot 10^7$.

Таким образом, окисление углерода оксидами железа шлакового расплава по реакции (27) протекает преимущественно с образованием CO_2 , при этом увеличении температуры расплава концентрация CO в газовой фазе также будет дополнительно увеличиваться.

Выводы

Выполненный термодинамический анализ физико-химических процессов, протекающих в рабочем пространстве конвертера при использовании факелов горения изменяет состав газовой фазы, в которой кроме традиционно присутствующих O_2 , CO , CO_2 появляются H_2 и H_2O , что приводит к изменению окислительной способности газовой фазы и теплового режима операции. В качестве универсальной характеристики описания равновесия в системе $Me - O - C$ целесообразно использовать парциальное давление кислорода P_{O_2} , а также сопутствующие характеристики P_{CO}/P_{CO_2} и P_{H_2}/P_{H_2O} . Окисление железа может осуществляться кислородом и в незначительной степени оксидом углерода CO_2 . Водяной пар H_2O при температурах 1600 – 2000 К практически не окисляет железо. Окисление растворенного в металле углерода осуществляется достаточно эффективно кислородом и оксидом углерода CO_2 до концентрации менее 0,1 % С и будет возрастать с повышением температуры. При сжигании газокислородного топлива оптимальный состав исходной газовой смеси (природный газ и кислород) должен соответствовать составу 100 % CH_4 и 69 % O_2 , при этом в качестве продукта реакций окисления образуется парогазовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O . Важным представляется отметить, что только при окислении метана кислородом может быть достигнута температура факела более 1800 К, а использование в качестве окислителя воздуха, углекислого газа, паров воды не будет обеспечивать необходимого теплового эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономике. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавателей*, Москва – Тула, 15-19 октября 2018 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2018:42–59.
2. Бойченко Б.М., Охотского В.Б., Харлашина П.С. *Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология*. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006:454.
3. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):102–109.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)
4. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
5. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
6. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергоэкономические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014:328.
7. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Перспективные технологии предварительного подогрева лома в полости конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;2:63–66.
8. Heikki J. Experiences in Physicochemical Modelling of Oxygen Converter Process (BOF). Shon International Symposium Advanced Principles. *Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
9. Chao Liu, Shu-Guo Zheng, Miao-Yong Zhu. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54B:1245–1261.
10. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determining redox parameters in the Fe – C – O_2 – H_2 system. *Steel in Translation*. 2011;41(8):631–635.
11. Падерина С.Н., Рьжонкова Д.И., Серова Г.В. и др. *Термодинамика, кинетика и расчеты металлургических процессов*. Москва: ИД НИТУ «МИСиС», 2010:235.
12. Дильдин А.Н., Чуманов И.В. *Физико-химические основы сталеплавленных процессов*. Вологда: Инфра-Инженерия, 2025:112.
13. Морачевский А.Г., Сладков И.Б., Фирсова Е.Г. *Термодинамические расчеты в химии и металлургии*. Санкт-Петербург: Лань, 2024:208.
14. Голстогузов Н.В. *Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов*. Москва: Металлургия, 1992:239.

15. Shamsuddin M. *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.
 16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
 17. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
 18. Карпенко Г.А., Меркер Э.Э. Интенсификация теплообмена над зоной продувки в конвертере. *Фундаментальные исследования*. 2005;2:44–46.
 19. *Атлас шлаков*. Москва: ОАО «ЕЕ Медиа», 2025:199.
 20. Белов Н.А. *Диаграммы состояния тройных и четверных систем*. Москва: МИСИС, 2007:360.
- REFERENCES**
1. Grigorovich K.V. *The current state of ferrous metallurgy and its development directions in the digital economy*. In: *Proceedings of the XV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Tula, October 15-19 2018. Moscow: ООО «RPK PrintAP». 2018:42–59. (In Russ.).
 2. Boichenko B.M., Okhotskogo V.B., Kharlashina P.S. *Converter steel production: theory, technology, steel quality, aggregate structures, material recycling and ecology*. Dnepropetrovsk: DneprVAL, 2006:454. (In Russ.).
 3. Protopopov E.V., Umanskii A.A., Shakirov M.K., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S. Physicochemical model of melt refining in converters with liquid-phase reduction. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2025;1(51):102–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)
 4. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
 5. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
 6. Merker Eh.Eh., Karpenko G.A. *Physical processes in the converter and energy-economic indicators of production*. Staryi Oskol: Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii». 2014:328. (In Russ.).
 7. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Chemyatevich A.G. Promising technologies for preheating scrap in the converter cavity. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2009; 2:63–66. (In Russ.).
 8. Heikki J. Experiences in Physicochemical Modelling of Oxygen Converter Process (BOF). *Shon International Symposium Advanced Principles. Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
 9. Chao Liu, Shu-Guo Zheng, Miao-Yong Zhu. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54B:1245–1261.
 10. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determining redox parameters in the Fe – C – O₂ – H₂ system. *Steel in Translation*. 2011;41(8):631–635.
 11. Paderina S.N., Ryzhonkova D.I., Serova G.V. etc. *Thermodynamics, kinetics and calculations of metallurgical processes*. Moscow: ID NITU «MISiS», 2010:235. (In Russ.).
 12. Dil'din A.N., Chumanov I.V. *Physico-chemical foundations of steelmaking processes*. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2025:112. (In Russ.).
 13. Morachevskii A.G., Sladkov I.B., Firsova E.G. *Thermodynamic calculations in chemistry and metallurgy*. Saint Petersburg: Lan', 2024:208. (In Russ.).
 14. Tolstoguzov N.V. *Theoretical foundations and technology of smelting silicon and manganese alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1992:239. (In Russ.).
 15. Shamsuddin M. *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.
 16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
 17. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
 18. Karpenko G.A., Merker E.E. Intensification of heat exchange above the purge zone in the converter. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2005;2:44–46. (In Russ.).
 19. *Atlas of slags*. Moscow: ОАО «ЕЕ Медиа», 2025:199. (In Russ.).
 20. Belov N.A. *Phase diagrams of ternary and quaternary systems*. Moscow: MISIS. 2007:360. (In Russ.).

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

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

E-mail: info@vpk-oil.ru

Николай Филиппович Якушев, д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

SPIN-код: 2998-9304

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

Evgeny A. Belenetskiy, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: info@vpk-oil.ru

Nikolai F. Yakushevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof.-Consultant of the Chair of Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

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

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.01.2026

После доработки 06.03.2026

Принята к публикации 10.03.2026

Received 28.01.2026

Revised 06.03.2026

Accepted 10.03.2026