



Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-912-920



## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В КОНВЕРТЕРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ПРОДУВКИ ДВУХЪЯРУСНЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ

Е. В. Протопопов, М. В. Темлянцев, Н. Ф. Якушевич,  
В. В. Солоненко, С. О. Сафонов

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

**Аннотация.** Выполнено теоретическое обоснование повышения эффективности дожигания конвертерных газов в агрегате при двухъярусной подаче разноимпульсных кислородных струй и сгорании CO до CO<sub>2</sub> в канальном потоке газов, выходящих из реакционной зоны. Проведен термодинамический анализ процесса дожигания отходящих газов в полости конвертера при использовании для продувки двухъярусных кислородных фурм. Показано, что при вдувании кислородных газовых струй через сопла верхнего яруса с расходом 10 – 40 % от общего минутного расхода не обеспечивается достаточно полное дожигание оксида углерода CO. Лимитирующими факторами являются неравномерное количество и неорганизованный выход образующегося в реакционных зонах CO в различные периоды операции, низкая эффективность перемешивания отходящего потока с высокоскоростными газовыми струями и чрезмерно избыточное количество кислорода, подаваемого для дожигания, недостаточное смешение компонентов газовой фазы и низкая скорость реакции. Показано, что при обеспечении условий для дожигания CO до соотношения концентрации в газовой фазе  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$  температура отходящего газа в полости конвертера может возрастать с 1800 до 2000 К, далее тепловой эффект от экзотермической реакции уменьшается. Количество кислорода, вдуваемого для дожигания CO, должно соответствовать остаточному содержанию углерода в металле при выполнении условия  $V_{O_2}^{доп}, м^3/мин \approx 100 [C_{ост}] \%$ . Избыток кислорода в газовой фазе и присутствие значительного количества нейтрального газа в значительной степени уменьшают коэффициент использования выделяющегося тепла в агрегате.

**Ключевые слова:** конвертер, двухъярусная фурма, дожигание отходящих газов, газовые струи, монооксид углерода, энтальпия, энергия Гиббса

**Для цитирования:** Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Якушевич Н.Ф., Солоненко В.В., Сафонов С.О. Исследование особенностей дожигания отходящих газов в конвертере при использовании для продувки двухъярусных кислородных фурм // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 912–920. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-912-920>

Original article

## FEATURES OF EXHAUST GASES AFTERBURNING IN A CONVERTER WHEN USING TWO-TIER OXYGEN LANCES FOR REFINING

E. V. Protopopov, M. V. Temlyantsev, N. F. Yakushevich,  
V. V. Solonenko, S. O. Safonov

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

**Abstract.** The theoretical substantiation was carried out for increasing the efficiency of converter gases afterburning in the unit with a two-tier supply of multi-pulse oxygen jets and combustion of CO to CO<sub>2</sub> in the channel flow of gases leaving the reaction zone. The authors made the thermodynamic analysis of the process of exhaust gases afterburning in converter cavity when using two-tier oxygen lances for refining. It is shown that when oxygen gas jets are blown through the upper-tier nozzles with a flow rate of 10 – 40 % of the total minute flow rate, a sufficiently complete afterburning of carbon monoxide CO is not provided. The limiting factors are the uneven amount and disorganized output of the CO formed in the reaction zones during various operation periods, low efficiency of mixing the waste stream with high-speed gas jets and an excessively excessive amount of oxygen supplied for afterburning, insufficient mixing of the components of the gas phase and low reaction rate. It is shown that when the conditions are provided for CO afterburning to the concentration ratio in the gas phase  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$ , temperature of the exhaust gas in the converter cavity can increase from 1800 to 2000 K, then the thermal effect of the exothermic reaction decreases. The amount of oxygen injected for CO afterburning must correspond to the residual carbon content in the metal at  $V_{O_2}^{доп}, м^3/мин \approx 100 [C_{ост}] \%$ . Excess of oxygen in the gas phase and presence of a significant amount of neutral gas significantly reduce the utilization rate of the generated heat in the unit.

**Keywords:** converter, two-tier lance, afterburning of exhaust gases, gas jets, carbon monoxide, enthalpy, Gibbs energy

**For citation:** Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Solonenko V.V., Safonov S.O. Features of exhaust gases afterburning in a converter when using two-tier oxygen lances for refining. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 912–920. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-912-920>

## ВВЕДЕНИЕ

Современная зарубежная металлургическая практика убедительно доказала, что осуществление процессов десиликонизации, десульфурации и дефосфорации чугуна за пределами доменной печи технически и экономически целесообразно с точки зрения повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности доменного и конвертерного производств [1–4]. В результате внедрения такой комплексной предварительной обработки жидкого чугуна широкое распространение получила так называемая «малошлаковая» технология конвертерной плавки [3–7]. При реализации такого варианта процесса необходимо учитывать, что из приходной части теплового баланса конвертерной плавки исключается химическое тепло, вносимое реакциями окисления кремния и фосфора, поэтому требуется искать способы технологической компенсации тепловых потерь или уменьшать долю лома в металлозавалке.

## ОСОБЕННОСТИ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

### В КОНВЕРТЕРЕ

При такой постановке задачи к наиболее перспективным вариантам процесса, очевидно, следует отнести применение твердого топлива и (или) организацию дожигания отходящих газов в полости конвертера с использованием специальных дутьевых устройств [5–10].

При изучении конвертерного процесса с дожиганием отходящих газов термодинамический анализ [11] и прикладная оценка показателя степени  $K_1$  дожигания CO до CO<sub>2</sub> подтверждают зависимость

$$K_1 = \frac{CO_2}{CO + CO_2} \cdot 100 \% = \frac{\xi_C}{1 + \xi_C} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\xi_C = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ ;  $P$  – парциальное давление соответствующего компонента.

Величина  $K_1$  зависит от соотношения количества {CO} в газовой фазе, образующегося в процессе окисления углерода, растворенного в металле, и расхода дополнительного кислорода, подаваемого для дожигания через специальные сопла, расположенные, как правило, по стволу фурмы выше основных сопел Лаваля в головке на 0,3–2,5 м [12–16]. Важное влияние на процесс дожигания оказывает степень перемешивания компонентов газовой фазы и вспенивание шлако-металлической эмульсии по ходу продувки конвертера.

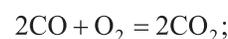
Исследования [17], посвященные изучению условий повышения эффективности процесса дожигания CO до CO<sub>2</sub>, базируются на определении оптимальных кинетических параметров, которые рассчитываются косвенно по показателю степени дожигания  $K_1$ .

В соответствии с уравнением (1) показатель степени дожигания зависит от количества кислорода, подаваемого через сопла верхнего яруса, диаметра и угла наклона этих сопел к вертикальной оси фурмы, степени и скорости смешения низкоскоростных струй кислорода с газовой фазой в рабочем пространстве конвертера, количества и скорости поступления оксида CO в зону дожигания [18–21]. Полнота протекания реакции дожигания, в свою очередь, определяется временем нахождения реагентов в области реакционной зоны, постоянно изменяющейся по составу и положению в объеме ванны, и непосредственно скоростью химической реакции, которая зависит от термодинамических параметров (температуры, состава газовой фазы и т.д.).

На основании ранее полученной информации [22–27] для промышленных 160-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнены расчеты, которые позволяют оценить эффективность развития процесса дожигания при использовании двухъярусных фурм и предлагаемых схем подачи технологических газов.

При глубине металлической ванны примерно 1,5 м, внутреннем диаметре агрегата 5,4 м, толщине слоя вспененного шлака 2 м и его плотности 0,54 т/м<sup>3</sup> объем газов, заполняющих рабочее пространство конвертера по высоте до среза горловины примерно 2,5 м, составляет приблизительно 50–60 м<sup>3</sup>. Время заполнения отходящим газом (до 90 % CO) полости конвертера изменяется от 3 с в период максимального образования оксида углерода CO (8–15 мин продувки) и до 20 с в начале и конце операции. При неполном дожигании CO, а также при значительном избытке кислорода, подаваемого для дожигания, количество газов и линейная скорость  $\theta$  газового потока, проходящего через сечение конвертера, существенно возрастают ( $\theta = 0,1 \div 1$  м/с) [28, 29].

Таким образом, основной процесс дожигания оксида углерода CO описывается реакцией



$$\Delta G_{(2)}^\circ = -556\,000 + 169T, \text{ Дж/моль } O_2;$$

$$\lg K_{(2)} = \frac{29\,000}{T} - 8,84; \quad (2)$$

$$K_{(2)} = \frac{P_{CO_2}^2}{P_{CO}^2 P_{O_2}}; \quad \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = K_{(2)}^{1/2} P_{O_2}^{1/2}.$$

При  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$   $P_{O_2} = \frac{1}{K_{(2)}}$ . При 1873 К  $\lg K_{(2)} = 6,68$ ,  $P_{O_2} = 2,1 \cdot 10^{-7}$ , при 2073 К  $\lg K_{(2)} = 5,16$ ,  $P_{O_2} = 6,92 \cdot 10^{-6}$ .

Изменения значений энергии Гиббса  $\Delta G_{(2)}^\circ = f(T)$  при  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$ , рассчитанные по результатам работы [16], и значения  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$  для отношений  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}}$ , составляющих 10 и 20 % общего минутного расхода 400 – 450 м<sup>3</sup>/мин на продувку, представлены в табл. 1 и на рис. 1 (в соответствии с работой [16] расчет дожигания СО до СО<sub>2</sub> проведен при  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}}$  10 и 20 %).

Как видно, при  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 10$  % в интервале температур 1750 – 2100 °С значение  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$  составляет 0,17 – 0,25, при температурах 1940 – 2550 °С – 0,19 – 0,31. Это значительно меньше, чем равновесное, которое соответствует стехиометрическому соотношению по реакции (2)  $\left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1\right)$ . При 1750 °С равновесное значение  $P_{O_2} \approx 5 \cdot 10^{-9}$ , при 1940 °С  $P_{O_2} \approx 6 \cdot 10^{-7}$  и далее возрастает с повышением температуры.

Использование новых конструктивных и технологических решений (оптимальная высота сопел второго яруса, использование разноимпульсных струй кислорода, подаваемых для дожигания СО, изменение угла наклона сопел, расхода газа на дожигание и т.д.) позволяет довести показатель степени дожигания  $K_1$  до значения 0,44 – 0,50, что практически соответствует стехиометрическому соотношению реакции (2) –  $\left(\frac{CO_2}{CO} = 1\right)$ ;  $P_{O_2}$  (1600 ÷ 1800 °С)  $\approx 1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-5}$ .

Как уже отмечалось, более полное дожигание СО до СО<sub>2</sub> с получением концентрации СО<sub>2</sub> сверх равновесной по отношению к реакции (2)  $\left(\frac{CO_2}{CO} = 1\right)$  возможно в присутствии в газовой фазе свободного кислорода в достаточно высоких концентрациях, например,  $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 10$  при 1800 °С,  $P_{O_2} = 0,001$ .

Для экзотермической реакции (2) изменение энтальпии  $\Delta H_{(2)} = 2\Delta H_{CO_2} - 2\Delta H_{CO} + (H_T - H_{298})O_2$  при температурах 1600 – 1800 °С составляет примерно 500 кДж/моль O<sub>2</sub>, при этом доля тепла на нагрев кислорода, подаваемого для дожигания, составляет 12 – 14 % (разница значений изменения энтальпий  $\Delta H_{(2)}$  и  $\Delta H_{(2CO_2-2CO)}$  на рис. 1).

Очевидно, что значительный избыток кислорода на дожигание по отношению к равновесным концентрациям нежелателен. Подача кислорода должна соответствовать объему образующегося оксида углерода СО, поступающего в рабочее пространство конвертера из объема ванны. Результаты расчета количества кислорода, необходимого для дожигания СО применительно к плавке в 160-т конвертере, приведены в табл. 2.

На рис. 2 показаны изменения по ходу продувки концентрации углерода в металле [С], % и [С] · 10<sup>-3</sup>, кг (на 160 т стали); скорости  $V_{CO}$  образования оксида углерода СО, м<sup>3</sup>/мин; скорости подачи кислорода, необходимого для дожигания СО, м<sup>3</sup>/мин; теплового эффекта от реакции дожигания СО до СО<sub>2</sub> ( $-\Delta H_{1873\text{ К}} \cdot 10^6$  кДж на 160 т стали); гипотетического теплового эффекта от реакции дожигания СО до СО<sub>2</sub> ( $\Delta H_{гип}$ ) с учетом предварительного нагрева кислорода.

Расчеты показывают, что всего за плавку образуется оксида углерода СО 59 000 м<sup>3</sup> (в среднем за 20 – 25 мин продувки  $V_{CO} = 2360$  м<sup>3</sup>/мин), необходимое количество кислорода для дожигания 37 700 м<sup>3</sup> (в среднем за 20 – 25 мин продувки  $V_{O_2} = 1508$  м<sup>3</sup>/мин).

Таблица 1

**Изменение температуры горения и состава газовой фазы в зависимости от расхода кислорода для дожигания**

Table 1. Changes in combustion temperature and composition of the gas phase depending on the oxygen consumption for afterburning

| Параметр                   | Расход кислорода для дожигания, %                      |                   |                   |                   |                   |  |                   |                   |                   |                   |
|----------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                            | 20   | 40                | 60                | 80                | 100               | 20   | 40                | 60                | 80                | 100               |
|                            | $\frac{Q_{O_2}^{доп} \cdot 100}{Q_{O_2}^{общ}} = 10\%$ |                   |                   |                   |                   | $\frac{Q_{O_2}^{доп} \cdot 100}{Q_{O_2}^{общ}} = 20\%$ |                   |                   |                   |                   |
| $t, ^\circ\text{C}$        | 1560   | 1750              | 1900              | 1950              | 2100              | 1570   | 1940              | 2070              | 2300              | 2550              |
| $\frac{CO_2}{CO+CO_2}, \%$ |  | 13,0              | 16,0              | 18,0              | 20,0              |  | 16,0              | 19,5              | 21,5              | 23,2              |
| $\frac{CO_2}{CO}$          |  | 0,17              | 0,19              | 0,22              | 0,25              |  | 0,19              | 0,25              | 0,285             | 0,31              |
| $P_{O_2}$                  |  | $5 \cdot 10^{-9}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-7}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ |  | $6 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ |

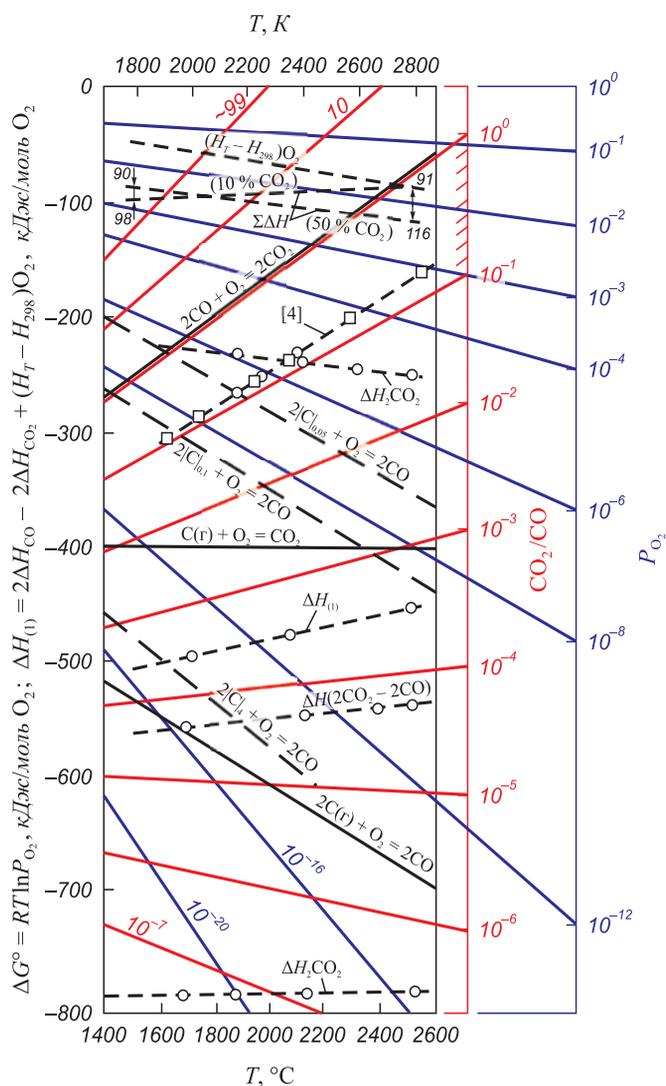


Рис. 1. Равновесные составы, энергии Гиббса, тепловые эффекты реакций в системе C–O при  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 10\%$  (○) и  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 20\%$  (□) (нижний индекс – содержание углерода [C] в металле, % (по массе))

Fig. 1. Equilibrium compositions, Gibbs energies, thermal effects of reactions in the C–O system at  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 10\%$  (○) and  $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 20\%$  (□) (the lower index is carbon content [C] in the metal, % wt.)

Как видно, в процессе продувки окисление углерода и, соответственно, скорость образования оксида углерода CO и количество кислорода, необходимое для окисления, значительно меньше, чем при постоянной интенсивности подачи кислорода для дожигания, что обуславливает неравновесные условия протекания реакции (2).

Только в период продувки с 5 по 15 минуту, при высокой скорости обезуглероживания кислорода для дожигания CO обычно подается в 1,5 – 2,0 раза больше расчетного (примерно 533 м³). Необходимое и достаточное количество кислорода для реализации реакции 300 – 400 м³. При дальнейшей продувке на заключительном этапе операции и незначительной остаточной

концентрации углерода в металле кислорода вводится в 3 – 5 раз больше необходимого.

Такое избыточное количество кислорода, подаваемого для дожигания, приводит к повышенному износу верхних горизонтов футеровки конвертера. Это зафиксировано в ранее выполненных работах [8 – 10, 22]. Необходимо также учитывать, что плотность потока оксида углерода CO, выходящего из реакционных зон и заполняющего полость конвертера выше поверхности шлака (ПК), составляет приблизительно 100 м³ и изменяется в пределах от 3 – 4 м³ CO/м³ ПК в начале продувки до 7 – 8 м³ CO/м³ ПК на седьмой-восьмой минутах (то есть при интенсивном обезуглероживании) и далее снижается до 0,3 – 0,4 м³ CO/м³ ПК на заключительном этапе.

Очевидно, такая динамика взаимодействия низкоскоростных кислородных струй для дожигания с изменяющимся по плотности потоком отходящих газов должна быть обязательно учтена в дутьевом режиме плавки, поскольку механизм их смешения может значительно отличаться в более плотном потоке и в потоке разреженных газов.

Линейная скорость прохождения газов в рабочем пространстве конвертера изменяется в пределах от 0,17 м/с (пятая минута продувки) до 0,43 м/с (восьмая минута), понижаясь далее до 0,1 м/с в конце плавки. То есть время пребывания образующихся газов в полости конвертера (на участке движения газов 2 – 3 м) составляет от 0,2 – 0,3 до 0,8 – 1,3 с. При таких скоростях движения отходящих газов обеспечить хорошее перемешивание компонентов газовой фазы и эффективное дожигание CO достаточно сложно, что предопределяет необходимость использования дополнительных технологических решений по ходу операции.

Таким образом, рациональный вариант организации продувки с дожиганием CO в полости конвертера заключается в регулируемой подаче кислорода через сопла верхнего яруса при расчетном дутьевом режиме и создании специальных условий для протекания реакции дожигания (2) с максимально возможными скоростями. Например, к таким условиям можно отнести технические решения, которые обеспечивают низкую скорость истечения газовых струй, сопоставимую со скоростью движения факелов горения, в том числе использование для дожигания сопел различных профилей, варьирование углов их наклона к вертикальной оси вплоть до направления вверх и вниз по стволу фурмы для увеличения пути и времени прохождения смешивающихся потоков газа.

Положительный эффект, безусловно, будет принести и дополнительное перемешивание нейтральным газом (N₂, Ar) расплава и реагентов газовой фазы [17].

В табл. 3 приведены дополнительно справочные данные [23] по изменению энтальпии реакции (2) и компонентов газовой фазы при температурах 1800 – 2800 К. Значения ( $N_T - H_{298}$ ) для O₂, N₂ и CO

Параметры продувки ванны 160-т конвертера

Table 2. Parameters of the 160-t converter bath refining

| Время продувки, мин | Содержание углерода в металле, % (по массе)<br>кг | Угар углерода за 5 мин, кг | Скорость окисления углерода |         | Количество образуемого СО |        | Необходимое количество кислорода для дожигаания СО, м³/мин | Избыток кислорода, м³/мин, при расходе 500 м³/мин | Выделение тепла от дожигаания СО до СО <sub>2</sub> на 160 т стали, 10 <sup>6</sup> кДж/мин, при температуре, К |        |
|---------------------|---|----------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------|--------|--|---|---|--------|
|                     |   |                            | кг/мин                      | % С/мин | кг/мин                    | м³/мин |  |   | 1873  | 2073   |
| 0                   | $\frac{4,0}{6400}$                                | 800                        | 160                         | 0,10    | 373,3                     | 298,6  | 170,6  | 330   | 3,33  | 3,320  |
| 5                   | $\frac{3,5}{5600}$                                | 2080                       | 416                         | 0,24    | 970,7                     | 776,5  | 443,7  | 56  | 8,67  | 8,407  |
| 10                  | $\frac{2,3}{3520}$                                | 1600                       | 320                         | 0,22    | 746,6                     | 597,3  | 341,3  | 159   | 6,67  | 6,470  |
| 15                  | $\frac{1,2}{1920}$                                | 1280                       | 256                         | 0,16    | 597,3                     | 477,8  | 273,0  | 227   | 5,34  | 5,176  |
| 20                  | $\frac{0,4}{640}$                                 | 480                        | 96                          | 0,06    | 224,0                     | 179,2  | 102,4  | 400   | 2,00  | 1,940  |
| 25                  | $\frac{0,1}{160}$                                 | 80                         | 16                          | 0,02    | 37,3                      | 29,8   | 17,0   | >400  | 0,40  | ~0,400 |

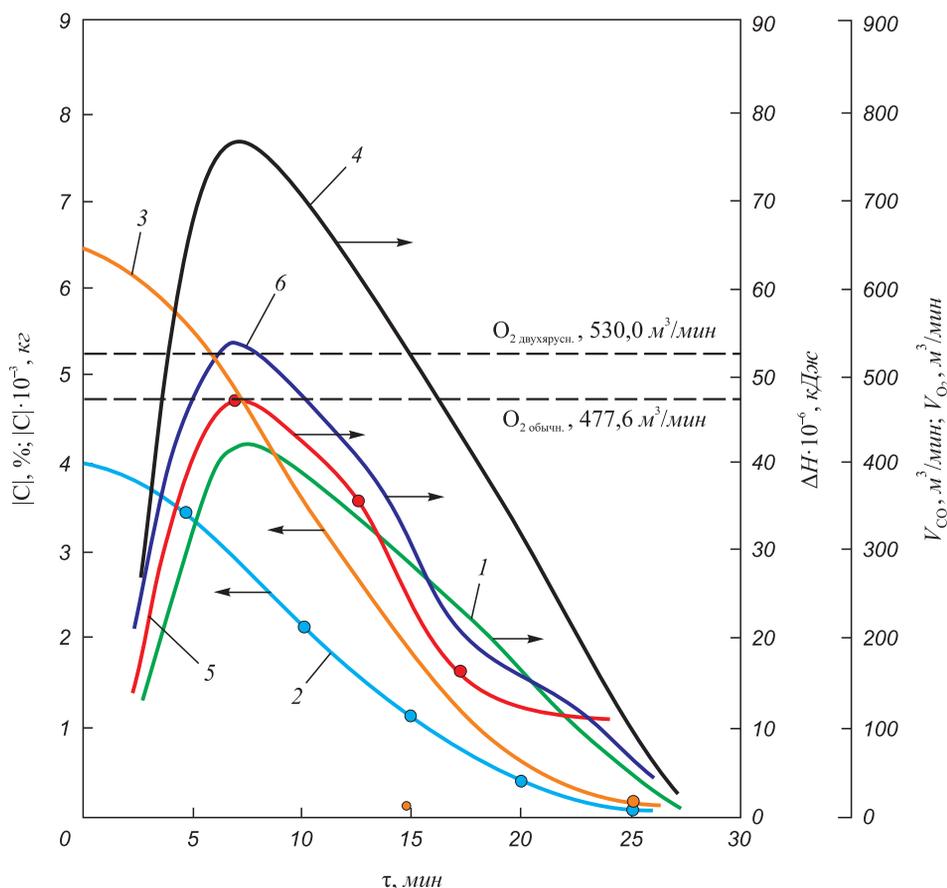


Рис. 2. Изменение показателей плавки по ходу продувки:  
1 – O<sub>2</sub> равн, м³/мин; 2 – |C|, %; 3 – |C|, кг; 4 – V<sub>CO</sub>, м³/мин; 5 – ΔH<sub>1600</sub>, °С; 6 – ΔH<sub>гнл</sub>

Fig. 2. Change of melting parameters during refining:  
1 – O<sub>2</sub> равн, m³/min; 2 – |C|, %; 3 – |C|, kg; 4 – V<sub>CO</sub>, m³/min; 5 – ΔH<sub>1600</sub>, °С; 6 – ΔH<sub>гнл</sub>

**Изменение энтальпии компонентов газовой фазы и реакции дожигания**

Table 3. Change in enthalpy of the gas phase components and afterburning reaction

| $\Delta H$ , кДж/моль | T, К |      |       |       | $H_{2800} - H_{1800}$ |
|-----------------------|------|------|-------|-------|-----------------------|
|                       | 1800 | 2000 | 2400  | 2800  |                       |
| $\Delta H_{(1)}$      | -505 | -496 | -476  | -456  | Данные табл. 4        |
| $H_T - H_{298}$ :     |      |      |       |       |                       |
| O <sub>2</sub>        | 51,7 | 59,2 | 74,5  | 90,1  |                       |
| N <sub>2</sub>        | 49,0 | 56,0 | 70,7  | 81,7  |                       |
| CO                    | 50,2 | 56,5 | 70,7  | 83,7  | 33,5                  |
| CO <sub>2</sub>       | 79,5 | 92,0 | 118,0 | 146,4 | 66,9                  |

**Влияние степени дожигания на изменение энтальпии газовой фазы**

Table 4. Influence of the afterburning degree on change in the gas phase enthalpy

| Количество CO <sub>2</sub> , % | $\Delta H_{1800\text{ К}} / \Delta H_{2800\text{ К}}$ , кДж      |   |                         |                    |
|--------------------------------|--|---|-------------------------|--------------------|
|                                | $\Delta H\{\text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2\} \approx 50$ кДж | $\Delta H_{\text{CO}_2} \approx 86$ кДж | $\Sigma \Delta H$ , кДж | % $\Delta H_{(1)}$ |
| 10                             | 45/77  | 8,0/14,6                                | 53,0/91,6               | 10,0/20,0          |
| 20                             | 40/69  | 16,0/24,2                               | 56,0/98,2               | 11,0/21,5          |
| 30                             | 35/60  | 24,0/44,0                               | 59,0/104,0              | 11,7/22,8          |
| 40                             | 30/51  | 32,0/58,0                               | 62,0/109,4              | 12,3/24,0          |
| 50                             | 25/43  | 40,0/73,0                               | 65,0/116,0              | 12,9/25,4          |

отличаются незначительно: при 1800 К соответственно 51,7, 48,95 и 50,2 кДж/моль; при 2800 К – 90,1, 81,7 и 83,68 кДж/моль. Независимо от изменения состава газовой фазы можно принимать одинаковые усредненные значения: для 1800 К  $H_{1800} - H_{298} \approx 50$  кДж/моль, для 2800 К  $H_T - H_{298} \approx 86$  кДж/моль.

Несколько больше значения изменения энтальпии для CO<sub>2</sub>. Так, при 1800 К значение  $(H_{1800} - H_{298})_{\text{CO}_2}$  составляет приблизительно 79,5 кДж/моль, при 2800 К – 146,4 кДж/моль. Чем больше степень дожигания CO до CO<sub>2</sub> и, соответственно, чем выше концентрация CO<sub>2</sub> в газовой фазе, тем больше затраты тепла на нагрев газовой фазы. При начальной температуре 1500 К доля тепла на нагрев газовой фазы на 200 К при изменении содержания CO<sub>2</sub> в газовой фазе от 10 до 50 % составляет 1,0 – 1,3 % от  $H_{1800}$  реакции (2), что соответствует возможному повышению температуры от  $T_{\text{нач}} = 1800$  К до 2000 К и от  $T_{\text{нач}} = 2000$  К до 2170 К (табл. 4). Зависимость изменения энтальпии реакции (2) в процессе продувки показана на рис. 2.

**Выводы**

Выполнено теоретическое обоснование повышения эффективности дожигания конвертерных газов в агре-

гате при двухъярусной подаче разноимпульсных кислородных струй и сгорания CO до CO<sub>2</sub> в канальном потоке газов, выходящих из реакционной зоны. Количество кислорода, вдуваемого для дожигания CO, должно соответствовать остаточному содержанию углерода в металле при соотношении  $V_{\text{O}_2}^{\text{доп}}, \text{ м}^3/\text{мин} \approx 100 [C_{\text{ост}}] \%$ .

Определены условия термодинамического равновесия реакции окисления CO кислородом. Равновесие реакции при температурах 1800 – 2800 К достигается при отношении  $\left(\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 1\right)$  и  $P_{\text{O}_2} \approx 1 \cdot 10^{-7}$  и, соответственно,  $\Delta G_{(2)}^\circ = -250 - 100$  кДж. Тепловой эффект реакции окисления при стехиометрическом количестве кислорода составляет примерно 500 кДж/моль O<sub>2</sub> (~350 кДж/м<sup>3</sup> O<sub>2</sub>) и незначительно снижается при повышении температуры. Температура газовой фазы в полости конвертера в начале продувки (до 5 – 6 мин) повышается с 1800 до 2000 К и далее в интервале 8 – 15 мин – с 2000 до 2170 К; тепловой эффект реакции дожигания CO в полости конвертера зависит от степени перемешивания газообразных компонентов, скорости протекания реакции и времени взаимодействия реагентов в контактной зоне. При преодолении кинетических затруднений и обеспечении необходимых

стехиометрических соотношений на начальной стадии окисления ( $T \approx 1800$  К) возможен подъем температуры газа до 2000 К ( $-\Delta H_{1873-2000\text{ К}} \approx 4,0 \cdot 10^7$  кДж), далее тепловой эффект от экзотермической реакции

уменьшается ( $-\Delta H_{2000-2200\text{ К}} \approx 32,0 \cdot 10^7$  кДж). Избыток кислорода в газовой фазе в значительной степени уменьшает коэффициент использования выделяющегося тепла в агрегате.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Воскобойников В.Г., Перказов И.М., Завидонский В.А. Внедоменная обработка чугуна за рубежом. Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». Вып. 2. М.: Институт «Черметинформация», 1986. 32 с.
2. Григорович К.В. Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития. В кн.: Труды XIV международного конгресса сталеплавателей. М.: МИСиС, 2016. С. 56–65.
3. Туркдоган Е.Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах // Инжекционная металлургия'86. Труды конференции. М.: Металлургия, 1990. С. 10–44.
4. Takebayshi T. The characteristics of BOF refining pretreated hot metal // International Oxygen Steelmaking Congress. Washington, USA. 1986. P. 557–562.
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. М.: Элиз, 2000. 64 с.
6. Югов П.И. Современное состояние мировой практики конвертерного производства и научные направления его развития в России // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2001. № 9. С. 9–13.
7. Kruskopf A., Visuri V.-V. A Gibbs energy minimization approach for modeling of chemical reactions in a basic oxygen furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2017. Vol. 48. No. 6. P. 3281–3300. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1074-x>
8. Баптизманский В.И., Куликов В.О., Китаев А.Т. и др. Работа 130-т конвертеров, оборудованных двухъярусными фурмами // Экспресс-информация ЦНИИ и ТЭИ ЧМ. 1974. Сер. 6. Вып. 3. С. 1–14.
9. Смоктий В.В., Лапицкий В.В., Белокуров Э.С. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах. Киев: Техника, 1992. 163 с.
10. Osani H., Ohmiya S. Total hot metals pretreatment and BOF operation practice for high purity steelmaking. In: 1 EOS Congress. Düsseldorf, 1993. P. 41–46.
11. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. О повышении эффективности продувки конвертерной ванны с дожигом отходящих газов в полости конвертера // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 2. С. 1–5.
12. Протопопов Е.В., Лаврик Д.А., Чернятевич А.Г., Мастеровенко Е.Л. Повышение эффективности дожигаания отходящих газов в конвертерах с жидкофазным восстановлением // Известия вузов. Черная металлургия. 2001. № 6. С. 13–17.
13. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5–9.
14. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking // Iron and Steel International. 1973. Vol. 16. No. 1. P. 38–40.
15. Tabata Y., Marsh R.C., Kelly P. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles // Steelmaking Conference Proceedings. 1998. P. 451–457.
16. Жульковский О.А., Чернятевич А.Г., Гресс А.В. Численное исследование процесса дожигаания отходящих газов в конвертере // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 1. С. 19–22.
17. Чернятевич А.Г., Айзатулов Р.С., Протопопов Е.В. Комбинированная продувка металла с подачей нейтрального газа сверху и через днище конвертера // Сталь. 1989. № 5. С. 20–23.
1. Voskoboynikov V.G., Perkazov I.M., Zavidonskii V.A. *Non-Straw Cast Iron Processing Abroad. Series "Preparation of Raw Materials for Metallurgical Processing and Production of Cast Iron". Issue 2.* Moscow: Institute "Chermetinformatsiya", 1986, 32 p. (In Russ.).
2. Grigorovich K.V. Metallurgy of the XXI century: Current state and development directions. In: *Proceedings of the XIV Int. Congress of Steelmakers.* Moscow: MISiS, 2016, pp. 56–65. (In Russ.).
3. Turkdogan E.T. Technological improvements in injection metallurgy and in metal refining processes in a ladle in the 80s. In: *Injection Metallurgy'86. Conf. Proceedings.* Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 10–44. (In Russ.).
4. Takebayshi T. The characteristics of BOF refining pretreated hot metal. *International Oxygen Steelmaking Congress. Washington, USA, 1986, pp. 557–562.*
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative Characteristics of the State of Oxygen-Converter Steel Production in Russia and Abroad.* Moscow: Eliz, 2000, 64 p. (In Russ.).
6. Yugov P.I. The Current state of the world practice of converter production and scientific directions of its development in Russia. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2001, no. 9, pp. 9–13. (In Russ.).
7. Kruskopf A., Visuri V.-V. A Gibbs energy minimization approach for modeling of chemical reactions in a basic oxygen furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2017, vol. 48, no. 6, pp. 3281–3300. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1074-x>
8. Baptizmanskii V.I., Kulikov V.O., Kitaev A.T., etc. Operation of 130-t converters equipped with two-tier lances. *Ekspress-informatsiya TsNII i TEI ChM.* 1974, series 6, no. 3, pp. 1–14. (In Russ.).
9. Smoktii V.V., Lapitskii V.V., Belokurov E.S. *Combined Processes of Steel Smelting in Converters.* Kiev: Technika, 1992, 163 p. (In Russ.).
10. Osani H., Ohmiya S. Total hot metals pretreatment and BOF operation practice for high purity steelmaking. In: *1 EOS Congress, Düsseldorf, 1993, pp. 41–46.*
11. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. On increasing the efficiency of converter bath refining with exhaust gases afterburning in converter cavity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1996, no. 2, pp. 1–5. (In Russ.).
12. Protopopov E.V., Lavrik D.A., Chernyatevich A.G., Masterovenko E.L. Improvement in efficiency of post combustion of off-gases in basic oxygen converters with liquid-phase reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2001, no. 6, pp. 13–17. (In Russ.).
13. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Investigation of oxygen jets interaction with exhaust converter gases. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1996, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.).
14. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking. *Iron and Steel International.* 1973, vol. 16, no. 1, pp. 38–40.
15. Tabata Y., Marsh R.C., Kelly P. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles. *Steelmaking Conference Proceedings.* 1998, pp. 451–457.
16. Zhul'kovskii O.A., Chernyatevich A.G., Gress A.V. Numerical investigation of exhaust gases afterburning in a converter. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1993, no. 1, pp. 19–22. (In Russ.).
17. Chernyatevich A.G., Aizatulov R.S., Protopopov E.V. Combined metal blowing with inert gas delivery from above and through converter bottom. *Steel in the USSR.* 1989, vol. 19, no. 5, pp. 202–204.

18. Normanton A.S., Davies M.W., Spenceley G.D., Kreijger P.J. Technical StaancTJoint development of BSC / Hoogovens bath agitation process and scrap enhancement in basic oxygen steelmaking // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1986. Vol. 69. P. 599–612.
19. Rymarchyk N. Post combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998. P. 445–449.
20. Somways N.L. Developments in the North-American iron and steel industry – 1994 // *Iron and Steel Engineer*. 1995. Vol. 71. No. 2. P. D1–D24.
21. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конверторов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1995. № 12. С. 13–17.
22. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. Справочник / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1969. 252 с.
23. Li Z., Hanaoka T. Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050 // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 161. Article 104853. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104853>
24. De Vos L., Cnockaert V., Bellemans I., Vercryssen C., Verbeken K. Critical assessment of the applicability of the foaming index to the industrial basic oxygen steelmaking process // *Steel Research International*. 2021. Vol. 92. No. 1. Article 2000282. <http://doi.org/10.1002/srin.202000282>
25. Yao L., Zhu R., Tang Y., Wei G., Dong K. Effect of furnace gas composition on characteristics of supersonic oxygen jets in the converter steelmaking process // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 15. Article 3353. <https://doi.org/10.3390/ma13153353>
26. Kwon J.-H., Lee J.-A., Lee K.-U., Han J.-W. A study on the supersonic jet nozzle to improve of the operating efficiency of the converter process // *Korean Journal of Metals and Materials*. 2020. Vol. 58. No. 8. P. 550–559. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.8.550>
27. Feng C., Chen S., Dong J., Zhu R., Wei G., Dong K. Influence of preheating temperature on the characteristics of O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> jet by mixed injection with a swirling oxygen nozzle // *JOM*. 2021. Vol. 73. No. 10. P. 2985–2994. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04836-2>
28. Zhang B., Chen K., Wang R., Liu C., Jiang M. Physical modelling of splashing triggered by the gas jet of an oxygen lance in a converter // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 4. Article 409. <https://doi.org/10.3390/met9040409>
29. Liu C., Tang L., Liu J., Tang Z. A dynamic analytics method based on multistage modeling for a BOF steelmaking process // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2019. Vol. 16. No. 3. P. 1097–1109. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2865414>
18. Normanton A.S., Davies M.W., Spenceley G.D., Kreijger P.J. Technical StaancTJoint development of BSC. Hoogovens bath agitation process and scrap enhancement in basic oxygen steelmaking. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1986, vol. 69, pp. 599–612.
19. Rymarchyk N. Post combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998, pp. 445–449.
20. Somways N.L. Developments in the North-American iron and steel industry – 1994. *Iron and Steel Engineer*. 1995, vol. 71, no. 2, pp. D1–D24.
21. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Development of tips of double-circuit lances for oxygen converters. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 12, pp. 13–17. (In Russ.).
22. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steelmaking*. Addison – Wesley Inc., 1963. (Russ. ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.).
23. Li Z., Hanaoka T. Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, vol. 161, article 104853. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104853>
24. De Vos L., Cnockaert V., Bellemans I., Vercryssen C., Verbeken K. Critical assessment of the applicability of the foaming index to the industrial basic oxygen steelmaking process. *Steel Research International*. 2021, vol. 92, no. 1, article 2000282. <http://doi.org/10.1002/srin.202000282>
25. Yao L., Zhu R., Tang Y., Wei G., Dong K. Effect of furnace gas composition on characteristics of supersonic oxygen jets in the converter steelmaking process. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 15, article 3353. <https://doi.org/10.3390/ma13153353>
26. Kwon J.-H., Lee J.-A., Lee K.-U., Han J.-W. A study on the supersonic jet nozzle to improve of the operating efficiency of the converter process. *Korean Journal of Metals and Materials*. 2020, vol. 58, no. 8, pp. 550–559. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.8.550>
27. Feng C., Chen S., Dong J., Zhu R., Wei G., Dong K. Influence of preheating temperature on the characteristics of O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> jet by mixed injection with a swirling oxygen nozzle. *JOM*. 2021, vol. 73, no. 10, pp. 2985–2994. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04836-2>
28. Zhang B., Chen K., Wang R., Liu C., Jiang M. Physical modelling of splashing triggered by the gas jet of an oxygen lance in a converter. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 4, article 409. <https://doi.org/10.3390/met9040409>
29. Liu C., Tang L., Liu J., Tang Z. A dynamic analytics method based on multistage modeling for a BOF steelmaking process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 1097–1109. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2865414>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** [protopopov@sibsiu.ru](mailto:protopopov@sibsiu.ru)

**Михаил Викторович Темлянец**, д.т.н., профессор, проректор по учебной и воспитательной работе, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-7985-5666  
**E-mail:** [uchebn\\_otdel@sibsiu.ru](mailto:uchebn_otdel@sibsiu.ru)

**Николай Филиппович Якушевич**, д.т.н., профессор, профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** [Yakushevich@cmet.sibsiu](mailto:Yakushevich@cmet.sibsiu)

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** [protopopov@sibsiu.ru](mailto:protopopov@sibsiu.ru)

**Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Educational and Tutorial Work, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-7985-5666  
**E-mail:** [uchebn\\_otdel@sibsiu.ru](mailto:uchebn_otdel@sibsiu.ru)

**Nikolai F. Yakushevich**, Dr. Sci. (Eng.), Prof.-Consultant of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering", Siberian State Industrial University  
**E-mail:** [Yakushevich@cmet.sibsiu](mailto:Yakushevich@cmet.sibsiu)

**Виталий Владимирович Солоненко**, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** Solonenko-nvkz@mail.ru

**Vitalii V. Solonenko**, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** Solonenko-nvkz@mail.ru

**Сергей Олегович Сафонов**, ассистент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** sergey.safonov.1950@mail.ru

**Sergei O. Safonov**, Assistant of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** sergey.safonov.1950@mail.ru

**Вклад авторов**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**Протопопов Е.В.** – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание статьи.  
**Темлянцеv М.В.** – обзор публикаций по теме статьи, написание статьи.  
**Якушевич Н.Ф.** – получение и анализ данных, написание статьи.  
**Солоненко В.В.** – получение и анализ данных.  
**Сафонов С.О.** – визуализация результатов исследований, доработка текста.

**E.V. Protopopov** – scientific guidance, formation of the research basic concept, goals and objectives, article writing.  
**M.V. Temlyantsev** – publications review, article writing.  
**N.F. Yakushevich** – data obtaining and analysis, article writing.  
**V.V. Solonenko** – data obtaining and analysis.  
**S.O. Safonov** – visualization of the research results, text revising.

Поступила в редакцию 11.10.2021  
 После доработки 29.10.2021  
 Принята к публикации 12.11.2021

Received 11.10.2021  
 Revised 29.10.2021  
 Accepted 12.11.2021