

Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-2(56)-121-129

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ
ФАКЕЛОВ ГОРЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
КОНВЕРТЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

© 2026 г. М. В. Темлянецв¹, М. Е. Корнет²

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

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Современное состояние и развитие конвертерного производства стали в значительной степени связывают с применением различного энергетического топлива. На основании теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены вопросы возможности регулирования окислительной способности газокислородных факелов при продувке углеродистой и легированной стали при различной степени разбавления факела природным газом. Установлено, что по мере увеличения диссоциации продуктов горения количество тепла, передаваемого из зоны продувки в объем металла, уменьшается, причем при продувке легированной стали процесс идет более интенсивно за счет реакции образования оксидов хрома, молибдена и других химических элементов, которые более эндотермичны, чем окисление железа до FeO. При продувке углеродистой стали среднее значение степени $\alpha_{\text{ср}}$ химического взаимодействия CO₂ и H₂O с элементами расплава составляет 0,69, в то время как для легированной стали прежде всего из-за наличия хрома оно смещается ближе к единице ($\alpha_{\text{ср}} = 0,74$), что способствует уменьшению количества тепла, выделяющегося в реакционной зоне. Добавка топлива в кислородные струи и реализация газокислородной продувки является эффективным способом уменьшения пылеобразования в конвертерной плавке, обеспечивает возможности улучшения теплового баланса плавки, снижает температуру реакционной зоны и, соответственно, развитие процесса дымовыделения, изменяет характер окисления и конденсации распыленных капель металла, способствуя коагуляции частиц и возвращения их в ванну. Для дальнейшего повышения эффективности работы системы газоочистки необходимо повсеместное снижение содержания пыли в отходящих газах и применение различных технологических способов уменьшения пылевыведения в процессе продувки.

Ключевые слова: конвертерный процесс, факелы горения, окислительная способность факелов, пылевыведение, дымообразование

Для цитирования: Темлянецв М.В., Корнет М.Е. Исследование окислительной способности газокислородных факелов горения при решении технологических задач конвертерных процессов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;2(56):121–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-121-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-121-129)

Original article

INVESTIGATION OF THE OXIDIZING ABILITY OF OXYGEN GAS GORENJE TORCHES IN SOLVING TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF CONVERTER PROCESSES

© 2026 M. V. Temlyantsev¹, M. E. Kornet²

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The current state and development of converter steel production is largely associated with the use of various energy fuels. Based on theoretical and experimental studies, the issues of the possibility of regulating the oxidizing ability of oxygen-gas flares when purging carbon and alloy steel with varying degrees of dilution of the flare with natural gas are considered. It has been found that as the dissociation of combustion products increases, the amount of heat transferred from the purge zone to the metal volume decreases, and when purging alloy steel, the process proceeds more intensively due to the reaction of formation of chromium, molybdenum oxides and other chemical elements, which are more endothermic than the oxidation of iron to FeO. Gorenje When purging carbon steel, the average value of the degree of chemical interaction of CO₂ and H₂O with the elements of the melt is 0.69, while for alloy steel, primarily due to the presence of chromium, it shifts closer to unity (0.74), which helps to reduce the amount of heat released in the reaction zone. Adding fuel to oxygen jets and implementing oxygen gas purging is an effective way to reduce dust formation in converter melting, provides opportunities to improve the thermal balance of melting, reduces the temperature of the reaction zone and, accordingly, the development of the smoke emission process, changes the nature of oxidation and condensation of atomized metal droplets, contributing to particle coagulation and their return to the bath. To further improve the efficiency of the gas purification system, it is necessary to reduce the dust content in the exhaust gases everywhere and use various technological methods to reduce dust emission during the purge process.

Keywords: converter process, gorenje torches, oxidizing ability of torches, dust emission, smoke formation

For citation: Temlyantsev M.V., Kornet M.E. Investigation of the oxidizing ability of oxygen-gas gorenje torches in solving technological problems of converter processes. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;2(56):121–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-121-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-121-129)

Введение

Технологическое развитие конвертерного производства в значительной степени связывают с широким использованием различных видов энергетического топлива, что позволяет оптимизировать процесс и снизить развитие серьезных недостатков, к которым можно отнести интенсивное пылеобразование и дымовыделение по ходу продувки расплава [1 – 3]. Указанные обстоятельства определяют серьезные ограничения технологии, дополнительные эксплуатационные затраты и требования к эффективности работы системы газоочистки конвертеров.

Такие процессы при использовании жидкого или газообразного топлива предусматривают формирование кислородно-топливных факелов при донной или донно-боковой подаче газовых струй в конвертерный агрегат (рис. 1). В рассматриваемом случае важнейшим вопросом является выбор варианта применения рациональных ви-

дов энергоносителей для осуществления процесса, эффективных режимов их ввода и сжигания в агрегате при нагреве, плавлении и рафинировании металлошихты.

В рассматриваемых условиях в системе Fe – C расплава кипеть может металл или его оксиды. Причем по разным оценкам температура кипения металла будет составлять порядка 2820 – 2850 °C, а его оксидов 2400 – 2500 °C, поэтому при таком соотношении температур должны прежде всего преимущественно испаряться оксиды железа и марганца, что полностью соответствует экспериментально полученным рассматриваемым по температуре реакционной зоны по ходу продувки в конвертере (2100 – 2700 °C). При этом реализация различных технических решений при смешении в потоке кислородных струй с жидким или газообразным топливом будет приводить к снижению температуры такой зоны примерно до температуры 1700 – 1900 °C за счет расхода тепла

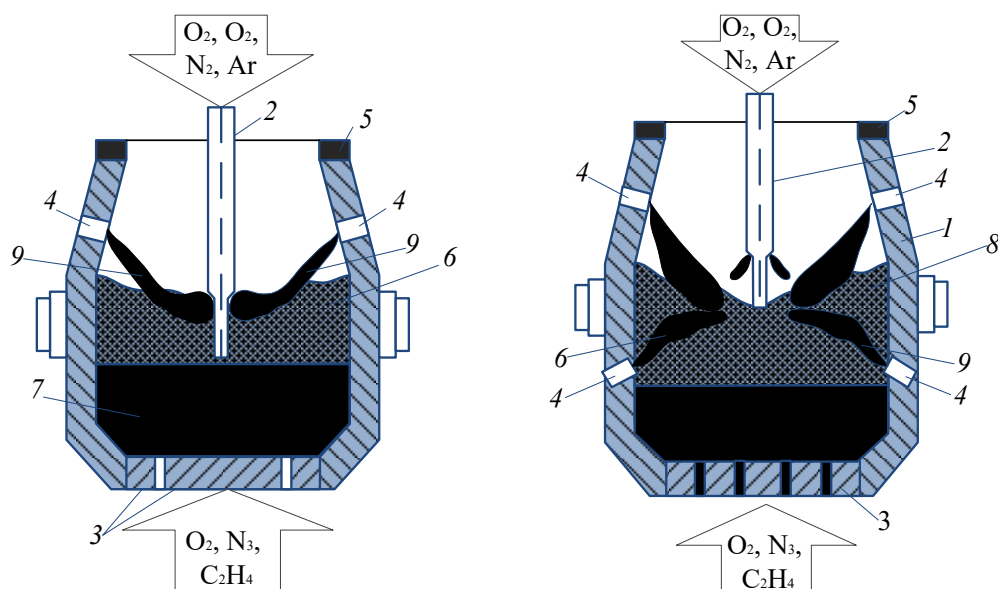


Рис. 1. Конвертеры с газокислородной продувкой:

1 – конвертер; 2 – двухъярусная фурма; 3 – донные устройства; 4 – газокислородные фурмы-горелки; 5 – шлакометаллическая эмульсия; 6 – металлическая ванна; 7 – факелы горения топлива

Fig. 1. Converters with oxygen-gas purge:

1 – converter; 2 – two-tiered tuyere; 3 – bottom devices; 4 – oxygen-gas tuyere burners; 5 – slag-metal emulsion; 6 – metal bath; 7 – fuel gorenje torches

на нагрев газов и развития эндотермических реакций диссоциации топлива. Поэтому положительной стороной этого процесса является уменьшение парциального давления паров испаряющейся фазы и пылеобразования [4 – 6]. В рассматриваемом случае ввод в конвертер совместно с кислородом топлива через донные или боковые сверхмощные фурмы-горелки позволяет дополнительно увеличить приход тепла в ванну [7 – 9].

При анализе показателей влияния изменения температуры (ΔT) реакционной зоны при продувке расплава газокислородными факелами использовали сопоставляемые показатели технологии подачи кислородно-топливной смеси при выплавке углеродистой (сталь 10-50, ГОСТ 10702 – 78) и легированной стали (для прокатных валков 7X2CM2Ф, ГОСТ 4543 – 71) [10 – 13].

В такой постановке задачи температура металла на условной границе реакционной зоны будет зависеть от количества тепла Q , передаваемого металлу из зоны продувки и размеров образующейся реакционной зоны.

Параметры теплообмена при отводе тепла из реакционной зоны в расплав можно представить на основании одной из форм закона Ньютона:

$$Q = \alpha(T_{p.z.} - T_{Me})F_{p.z.}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (определяется параметрами циркуляции металла и его теплофизическими свойствами (удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость и др.); $T_{p.z.}$ и T_{Me} –

температура реакционной зоны и металла, К; $F_{p.z.}$ – основные размеры реакционной зоны.

Точный теоретический расчет температуры реакционной зоны на условной границе с учетом гидродинамических и тепловых явлений представляет собой очень сложную комплексную задачу, поэтому в такой постановке воспользовались теорией теплового пограничного слоя (законом Фурье).

Сопоставимые технологии продувки позволяют сделать допущения равенства коэффициентов теплообмена α , тогда возможно воспользоваться выражением (1) для сравнения основных тепловых процессов в реакционной зоне. При этом удельный тепловой поток q из реакционной зоны в объем расплава можно определить как

$$q = \frac{Q}{F_{p.z.}} \alpha \Delta T \text{ или } \Delta T = \frac{Q}{\alpha F_{p.z.}}, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_{p.z.} - T_{Me}$.

Приняв $\alpha_1 = \alpha_2$, для обеих сопоставимых вариантов технологии продувки можно записать:

$$\frac{\Delta T_{л}}{\Delta T_{у}} = \frac{Q_{л} F_{p.z.1}}{F_{p.z.2} Q_{у}}, \quad (3)$$

где $\Delta T_{л}$ и $\Delta T_{у}$ – перегрев реакционной зоны над осредненной температурой в ванне для легированной и углеродистой сталей; $Q_{л}$ и $Q_{у}$ – тепловой эффект реакции окисления химических эле-

ментов расплава продуктами сгорания природного газа при продувке легированной и углеродистой сталей; $F_{p,3_1}$ и $F_{p,3_2}$ – площади поверхности реакционной зоны при сопоставимых условиях технологии производства легированной (индекс 1) и углеродистой (индекс 2) стали.

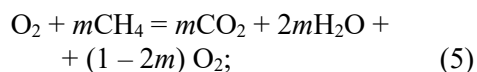
Тогда в соответствии с принятым допущением $F_{p,3_1} = F_{p,3_2}$, выражение (3) можно упростить и представить в следующем виде:

$$\frac{\Delta T_{\text{л}}}{\Delta T_{\text{у}}} = \frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{у}}}. \quad (4)$$

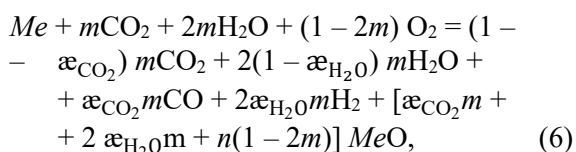
При этом как показывает выполненный анализ, для уменьшения испарения оксидов металла в высокотемпературной реакционной зоне следует обеспечивать режим продувки, при котором значение величины $\frac{Q}{F_{p,3}}$ будет наименьшим.

В соответствии с современными представлениями преимущественное окисление примесей металла по ходу продувки происходит в реакционной зоне, поэтому для упрощения расчетов принимаем такой механизм окисления железа, пренебрегая возможность развития диссоциации углеводородного топлива в струях. Тогда в соответствии с законом действующих масс одновременное развитие химических реакций в реакционной зоне будет иметь следующий вид:

– окисление метана кислородом в струях



– окисление металла кислородом и продуктами горения (CO_2 и H_2O)

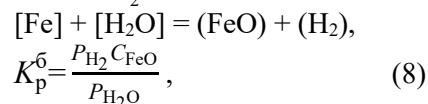
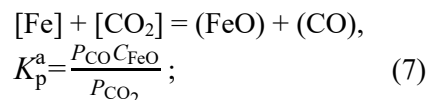


где m – количество молей CH_4 , приходящихся на 1 моль O_2 ; α_{CO_2} и $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ – степень химического взаимодействия CO_2 и H_2O с элементами расплава; n – коэффициент, уравнивающий валентности соответствующего элемента и окислителя в правой и левой частях уравнения.

Величина m связана обратной зависимостью с коэффициентом расхода кислорода A . Тогда при добавке топлива ($m = 0 \div 0,5$) продуктами горения являются CO_2 и H_2O и избыточный кислород. При $m > 0,5$ в продуктах горения, кроме упомянутых компонентов, будут присутствовать CO и H_2 . В дальнейшем при окислительной продувке

рассмотрение тепловых эффектов реакций проводили только при $m = 0 \div 0,5$.

Реакции окисления железа продуктами горения топлива и константы равновесия (K_p) этих реакций можно записать



где P – парциальное давление компонентов; C – концентрация компонентов.

Тогда завершенность протекания реакций (7) и (8) (то есть использование кислорода продуктов горения на окисление металла) будет равна $(1 - \alpha)$, и, соответственно, этому парциальное давление каждого из газов $P_{\text{CO}} = \alpha P$; $P_{\text{CO}_2} = (1 - \alpha)P$; $P_{\text{H}_2} = \alpha P$; $P_{\text{H}_2\text{O}} = (1 - \alpha)P$.

Для стандартных условий ($P = 0,1$ МПа и $\text{FeO} \leq 1$) константы равновесия рассматриваемых

реакций будут $K_p^{a,b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$, откуда $\alpha = \frac{K_p^{a,b}}{1 + K_p^{a,b}}$,

$\lg K_p^{a,b} = -\frac{\Delta z_{a,b}^0}{4,575T}$, где $\Delta z_{a,b}^0$ – изменение изобарно-изотермического потенциала реакций окисления железа продуктами горения, при этом рассматриваемая величина для реакций (7) и (8) легко определяется с помощью табличных данных [14; 15]. Температурные зависимости изменения степени химического взаимодействия продуктов горения с легированной сталью представлено на рис. 2. В интервале температур 1800 – 2500 К средняя степень химического взаимодействия продуктов горения метана при продувке факелом в погружном режиме составляет 60 – 75 %. Для некоторых химических элементов, содержащихся в металле рассматриваемой стали, например, Fe, Cr, Mo – эта величина представлена кривыми 1; 1'; 2; 2'; 3; 3' (рис. 2).

Добавка метана к кислородному дутью способна связывать в реакционной зоне значительное количество кислорода, снижая в целом окислительную способность дутья и уменьшая угар металла по сравнению с продувкой чистым кислородом. Следовательно, степень диссоциации в ванне CO_2 и H_2O является одной из основных характеристик газокислородной продувки, определяющих окислительные и нагревательные свойства дутья.

При продувке стали для прокатных валков (содержащей более 90 % Fe; примерно 2 % Cr и 2 % Mo) реакции окисления этих элементов продуктами сгорания метана и избыточным кислородом следующие:

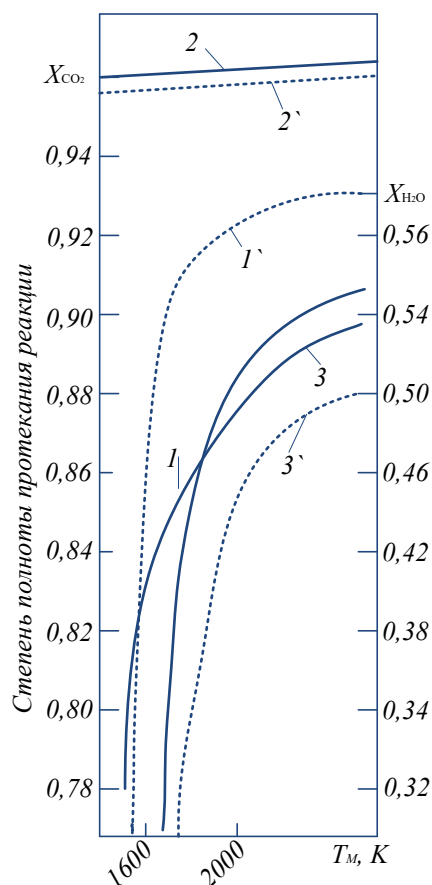
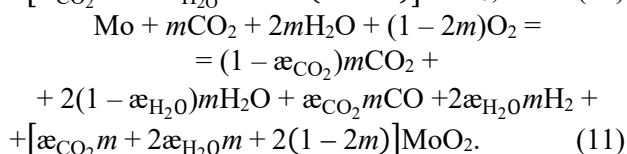
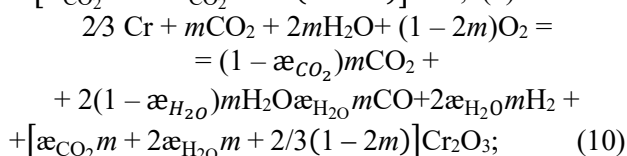
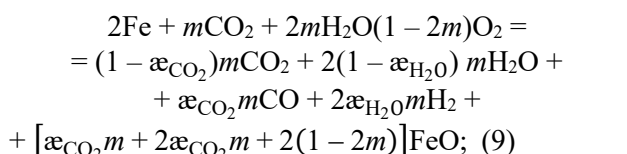


Рис. 2. Зависимость степени взаимодействия продуктов горения метана от температуры реакционной зоны при взаимодействии с элементами расплава легированной стали:

— — CO₂; - - - - H₂O

Fig. 2. Dependence of the degree of interaction of methane combustion products on the temperature of the reaction zone when interacting with alloy steel melt elements:

— — CO₂; - - - - H₂O



Тогда тепловой эффект реакций (5) и (6) составит

$$Q = [\alpha_{\text{CO}_2}m + 2\alpha_{\text{H}_2\text{O}}m + n(1 - 2m) + m(1 - \alpha_{\text{CO}_2})Q_{\text{CO}_2} + \alpha_{\text{CO}_2}mQ_{\text{CO}_2} + 2(1 - \alpha_{\text{H}_2\text{O}})mQ_{\text{H}_2\text{O}} - mQ_{\text{CH}_4}]. \quad (12)$$

В целом при определенных допущениях с учетом концентрации суммарный тепловой эффект реакции окисления легированной стали составит

$$Q = 0,9Q_9 + 0,02Q_{10} + 0,02Q_{11} - mQ_{\text{CH}_4}, \quad (13)$$

где Q_9, Q_{10}, Q_{11} – тепловые эффекты реакций (9) – (11).

Расчеты теплового эффекта выполнен во всем диапазоне изменений параметра α . Так при температуре $T_{\text{Me}} = 1800$ К теплота образования оксидов FeO, Cr₂O₃, CO₂, CO, H₂O, MoO₂ и CH₄, отнесенная к одному молю, принята 54700, 270500, 94100, 28080, 60110, 130800 и 22100 ккал/моль O₂. Результаты расчетов по выражениям (12), (13) представлены на рис. 3. При формировании факела по мере увеличения степени разбавления кислорода природным газом и, соответственно, увеличения степени разложения продуктов горения количество тепла, передаваемого от зоны продувки в объем металла будет уменьшаться в обоих случаях. Причем при продувке расплава, легированного процесс, идет более интенсивно. Это свидетельствует о том, что реакции образования оксидов хрома, молибдена и других элементов сложного химического состава стали более эндотермичные, чем окисление железа до оксида FeO. Кроме того, при продувке углеродистой стали при температуре 1800 К среднее значение степени разложения продуктов горения $\alpha_{\text{ср}}$ составляет 0,69 (рис. 3), в то время как для легированной стали прежде всего из-за наличия хрома, оно смещается ближе к единице ($\alpha_{\text{ср}} = 0,74$), что, в свою очередь, также способствует уменьшению количества тепла, выделяющегося в реакционной зоне.

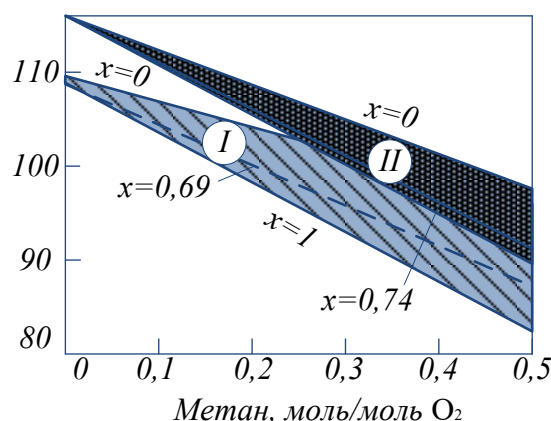


Рис. 3. Зависимость количества тепла, выделяющегося в реакционной зоне, от доли метана в газокислородном факеле при продувке углеродистой (зона I) и легированной (зона II) сталей при различных значениях α

Fig. 3. Dependence of the amount of heat released in the reaction zone on the proportion of methane in the oxygen-gas flare during purging of carbon (zone I) and alloy (zone II) steels at different values of α

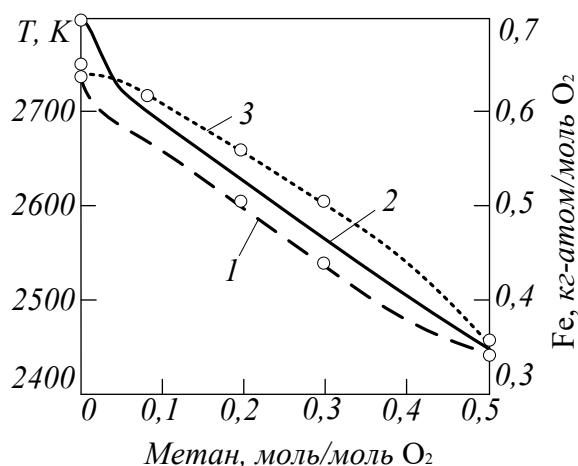


Рис. 4. Влияние добавки метана к кислородному потоку на температуру в реакционной зоне углеродистой стали (1), легированной стали (2) и испарение железа (3)

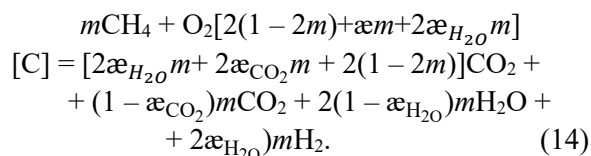
Fig. 4. The effect of methane addition to the oxygen stream on the temperature in the reaction zone of carbon steel (1), alloy steel (2) and iron evaporation (3)

Чтобы оценить по уравнению (4) влияние разбавления потока природным газом в факелах на величину $\Delta T_{\text{л}}$ необходимо знать значения Q_y и ΔT_y для определения которых, например, можно использовать данные работы [14] (рис. 4, 1).

Если конкретные значения ΔT_y , Q_y , $Q_{\text{л}}$ (рис. 3, 4) подставить в уравнение (4), то можно определять значение $\Delta T_{\text{л}}$. При этом принимая температуру металлической ванны, равной 1800 К, и суммируя с ней величину $\Delta T_{\text{л}}$, возможно определение теоретической температуры в реакционной зоне и влияние на нее добавки метана при продувке легированной стали погружным газокислородным факелом (рис. 4, 2). Как установлено по мере увеличения доли метана в потоке температура в реакционной зоне снижается и, соответственно, будет уменьшаться процесс испарения железа, марганца и других элементов в ней и, соответственно, пылевынос частиц пара. Определено, что оптимальные условия продувки газокислородным факелом легированной стали достигаются при коэффициенте расхода кислорода $A = 1,8 \div 2,0$ ($m \leq 0,278$). В этом случае температура в реакционной зоне (по сравнению с продувкой технически чистым кислородом) снижается на 200 – 210 °С, что уменьшает испарение железа приблизительно в 1,3 раза (рис. 4).

Приход тепла, поступающего в объем расплава из реакционной зоны, при увеличении доли разбавления кислорода природным газом не обязательно приводит к снижению скорости нагрева ванны в целом. Объясняется это тем, что взаимодействие металла с продуктами полного сгорания газа (CO_2 , H_2O) приводит к выделению в ванне дополнительного тепла, величину которого можно оценить с помощью теплового эффекта

реакции окисления углерода продуктами горения и избыточным кислородом:



Тепловой эффект реакции (13), рассчитанный на основании закона Гесса, при допущениях, что $\alpha_{\text{CO}_2} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha$, а температура конечных продуктов реакции равна температуре металлической ванны ($T_{\text{Me}} = 1800$ К), составит:

$$Q_X = 56160 + 84070m - 92070\alpha m. \quad (15)$$

Тогда количество тепла, усвоенного ванной, можно определить как разность между суммарным теплом Q_{Σ} и теплом, теряемым с отходящими из агрегата газами

$$Q_{\text{усв}} = Q_{\Sigma} - Q_{\text{отх}}, \quad (16)$$

где $Q_{\text{отх}} = V_{\text{г}} C_{\text{г}} T_{\text{Me}}$; $C_{\text{г}} = C_{\Sigma} = \sum c_j n_j$ – удельная теплоемкость конвертерного газа, представляющего собой смесь нескольких газов; c_j – удельная теплоемкость каждого газа в смеси, вычисленная при определенной температуре $T_{\text{отх.г}}$; n – число компонентов газа в смеси.

При определении количества тепла, теряемого с отходящими газами $Q_{\text{отх}}$, объем отходящих газов $V_{\text{отх}}$ может быть рассчитан по соответствующей зависимости, а их теплоемкость $C_{\text{г}}$ может быть принята в соответствии с работой [15 – 17]. Количество тепла, усвоенного ванной от реакции окисления углерода Q_y , при малых значениях степени разложения продуктов горения ($\alpha_{\text{ср}}$ менее 0,6) возрастает по мере увеличения доли природного газа в кислородном потоке (рис. 5) [18 – 20]. Значению $\alpha > 0,7$ соответствует меньшая величина Q_y , а при $\alpha = 1,0$ и $m > 0,45$ металлическая ванна может даже охлаждаться, так как при полной диссоциации продуктов горения реакция окисления углерода будет идти с эндотермическим эффектом. В целом, в соответствии с выражением (14) окислительная способность газокислородного дутья может быть описана следующим образом:

$$[2(1 - 2m) + \alpha_{\text{CO}_2} m + 2\alpha_{\text{H}_2\text{O}} m] \cdot [\text{C} \%]. \quad (17)$$

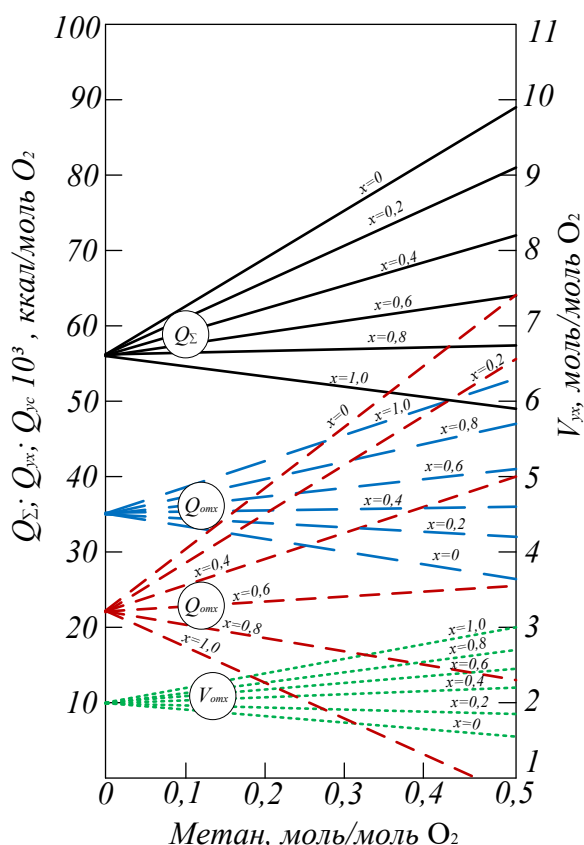


Рис. 5. Изменение суммарного Q_{Σ} , теряемого $Q_{\text{пот}}$ с отходящими газами и усвоенного $Q_{\text{усв}}$ количества тепла и объема отходящих газов $V_{\text{отх}}$ в зависимости от добавки метана к кислороду при продувке

Fig. 5. Change in the total Q_{Σ} , the amount of heat lost $Q_{\text{пот}}$ with the exhaust gases and the amount of heat absorbed $Q_{\text{усв}}$ and the volume of exhaust gases $V_{\text{отх}}$ depending on the addition of methane to oxygen during purging

Окислительную способность такого факела можно изменять в широком диапазоне и при этом решать различные технологические задачи процесса.

Выводы

Добавка топлива в кислородные струи и реализация газокислородной продувки является эффективным способом уменьшения пылеобразования в конвертерной плавке. Такое техническое решение позволяет уменьшать температуру реакционной зоны и процесс испарения и дымообразования, изменяет характер окисления расплавленных капель металла, способствуя коагуляции частиц, постепенному оседанию и возвращению их в ванну. Одновременно изменяются характеристики теплового баланса плавки, однако добавка топлива в газовые струи в целом, не позволяет снизить показатели пылевыведения до значений, обеспечивающих технологию продувки без системы газоочистки.

Для уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат работы системы газоочистки необ-

ходимо всемерно снижать содержание пыли в отходящих газах, применяя различные технологические способы уменьшения выноса в процессе плавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. *Конвертерное производство стали: теория, технологии, качество стали, конструкции агрегатов рециркуляция материалов и экология*. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006:454.
2. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергoэкономические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014: 328.
3. Кудрин В.А. *Теория и технология производства стали*. Москва: Мир, 2003:528.
4. Wang Jiahui, Fang Qing, Jia Jin et al. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
5. 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.
6. Chao Liu, Zheng Shu-Guo, Zhu Miao-Yong. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54:1245–1261.
7. 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.
8. 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.
9. Heikki J. Experiences in Physicochemical Modelling of Oxygen Converter Process (BOF). *Shon International Symposium Advanced Principles. Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
10. 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.
11. Shamsuddin M. *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.

12. 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.
13. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
14. Дильдин А.Н., Чуманов И.В. *Физико-химические основы сталеплавильных процессов*. Вологда: Инфа-Инженерия, 2025:112.
15. Морачевский А.Г., Сладков И.Б., Фирсова Е.Г. *Термодинамические расчеты в химии и металлургии*. Санкт-Петербург: Лань, 2024:208.
16. Падерина С.Н., Рыжонкова Д.И., Серова Г.В. и др. *Термодинамика, кинетика и расчеты металлургических процессов*. Москва: ИД НИТУ «МИСиС», 2010:235.
17. Ассад М.С., Пенязьков О.Г. *Продукты сгорания жидких и газообразных топлив*. Минск: Беларус. Навука, 2010:305.
18. Оденталь Х.-Ю., Шлютер Й., Лакхмунд Х., Брукхауз Р. Повышение эффективности продувки кислородом и инертными газами в кислородно-конвертерном процессе. *Черные металлы*. 2014;3:84–99.
19. Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Юрьев А.Б. *Энерготехнология твердого топлива*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015:247.
20. Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Кузнецов С.Н. *Производство восстановителей и технологического топлива для черной металлургии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018:156.
21. 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. (In Russ.).
22. Chao Liu, Zheng Shu-Guo, Zhu Miao-Yong. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54:1245–1261.
23. 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.
24. 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.
25. Heikki J. Experiences in Physicochemical Modeling of Oxygen Converter Process (BOF). Shon International Symposium Advanced Principles. *Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
26. 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.
27. Shamsuddin M. *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.
28. 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.
29. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
30. Dil'din A.N., Chumanov I.V. *Physico-chemical bases of steelmaking processes*. Vologda: Infa-Inzheneriya, 2025:112. (In Russ.).
31. Morachevskii A.G., Sladkov I.B., Firsova E.G. *Thermodynamic calculations in chemistry and metallurgy*. Saint Petersburg: Lan', 2024:208. (In Russ.).
32. Paderina S.N., Ryzhonkova D.I., Serova G.V. et al. *Thermodynamics, kinetics and calculations of metallurgical processes*. Moscow: ID NITU «MISiS», 2010:235. (In Russ.).
33. Assad M.S., Penyaz'kov O.G. *Combustion products of liquid and gaseous fuels*. Minsk: Belarus. Navuka, 2010:305. (In Russ.).
34. Odental' KH.-YU., Shlyuter I., Lakhmund Kh., Brukkhausz R. Improving the efficiency of purging with oxygen and inert gases in the oxygen

REFERENCES

1. Boichenko B.M., Okhotskii V.B., Kharlashin P.S. *Converter steel production: theory, technology, steel quality, aggregate designs, material recycling and ecology*. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2006:454. (In Russ.).
2. Merker E.E., 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.).
3. Kudrin V.A. *Theory and technology of steel production*. Moscow: Mir, 2003:528. (In Russ.).
4. Wang Jiahui, Fang Qing, Jia Jin et al. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
5. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Chernyatovich A.G. Promising technologies for preheating scrap in the converter cavity. *Izvestiya*

converter process. *Chernye metally*. 2014;3:84–99. (In Russ.).

19. Shkoller M.B., Protopopov E.V., Yur'ev A.B. *Energy technology of solid fuels*. Novosibirsk. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2015:247. (In Russ.).
20. Shkoller M.B., Protopopov E.V., Kuznetsov S.N. *Production of reducing agents and process fuels for ferrous metallurgy*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2018:156. (In Russ.).

Сведения об авторах

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-7985-5666

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

SPIN-код: 6169-5458

Мария Евгеньевна Корнет, старший преподаватель кафедры инженерной кибернетики, соискатель, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: marya.kornet@gmail.com

SPIN-код: 1541-9588

Information about the Authors

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. Departments of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-7985-5666

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

SPIN-код: 6169-5458

Maria E. Kornet, Senior Lecturer of the Chair of Engineering Cybernetics, the applicant, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: marya.kornet@gmail.com

SPIN-код: 1541-9588

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.04.2026

После доработки 14.05.2026

Принята к публикации 23.05.2026

Received 10.04.2026

Revised 14.05.2026

Accepted 23.05.2026