



Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-12-843-850

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2449>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ПОЛОСТИ КОНВЕРТЕРА

Е. В. Протопопов, Л. В. Думова, Н. А. Чернышева,
И. В. Ноздрин, С. О. Сафонов

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

Аннотация. С учетом волновой структуры течения сверхзвуковой струи, истекающей в рабочее пространство конвертера после выпуска металла, рассмотрены особенности и характеристики процессов распространения нейтральных газовых струй на газодинамическом участке до начала взаимодействия со шлаковым расплавом, в дальнейшем раздуваемым для нанесения огнеупорного гарнисажа на футеровку агрегата. Рассматривается модель расчета присоединенной массы окружающего газа, находящегося в рабочем пространстве конвертера. При постановке задачи учитываются известные данные по газодинамике при формировании и течении струи, которые оказывают влияние на эффективность турбулентного переноса в пограничном слое. В основе схемы расчета лежит гипотеза существования начальной границы, через которую в газовую струю проникает химически активный газ из окружающей среды, а форма предельной границы предполагается цилиндрической с радиусом, равным максимальному радиусу первой бочки нерасчетной струи. Численные расчеты позволяют определить среднюю скорость и температуру в произвольном сечении сверхзвуковой нерасчетной струи до внедрения ее в шлаковый расплав. Установлено влияние относительной температуры θ , температуры азота перед соплом T_0 при распространении струи в полости конвертера и расхода азота через сопла V_n на величину присоединенной массы q , осредненные значения скорости W_x и температуры T_x в произвольном сечении $\bar{x}$ сверхзвуковой нерасчетной струи на газодинамическом участке. Полученная информация может быть использована при разработке систем газопорошковой продувки в агрегатах и сталеразливочных ковшах, систем торкретирования и подачи нейтральных газовых струй при замещении кислородных потоков по ходу продувки и использовании двухфазных фурм.

Ключевые слова: шлаковый гарнисаж, степень нерасчетности, сверхзвуковая струя, пограничный слой, сопло, газовая фаза конвертера, средняя массовая скорость

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-29-20170.

Для цитирования: Протопопов Е.В., Думова Л.В., Чернышева Н.А., Ноздрин И.В., Сафонов С.О. Моделирование термогазодинамических параметров нейтральных газовых струй при распространении в полости конвертера // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 12. С. 843–850. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-12-843-850>

Original article

MODELING OF THERMOGASODYNAMIC PARAMETERS OF NEUTRAL GAS JETS WHEN SPREADING IN CONVERTER CAVITY

E. V. Protopopov, L. V. Dumova, I. V. Nozdrin,
N. A. Chernysheva, S. O. Safonov

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

Abstract. The article considers the features and characteristics of spreading of neutral gas jets in the gas-dynamic section before interaction with the slag melt, which is further inflated to apply a refractory skull to the unit lining. The flow of a supersonic jet into the working space of the converter after tapping has the wave structure. The model for calculation of attached mass of the surrounding gas located in the converter working space is considered. The problem statement takes into account the known data on gas dynamics during the formation and flow of the jet, which affect the efficiency of turbulent transfer in the boundary layer. The calculation scheme is based on the hypothesis of existence of an initial boundary through which a chemically active gas from the environment penetrates into the gas jet, and the shape of the limit boundary is assumed to be cylindrical with a radius equal to the maximum radius of the first barrel of the non-calculated jet. Numerical calculations make it possible to determine the average

mass velocity and temperature in an arbitrary section of a supersonic non-calculated jet before its introduction into the slag melt. The authors describe the influence of the relative temperature θ , nitrogen temperature in front of the nozzle T_0 during spreading of the jet in the converter cavity, and nitrogen flow through the nozzles V_n on value of the attached mass g , the averaged values of velocity and temperature W_x and T_x in an arbitrary cross-section $\bar{x}$ of a supersonic non-calculated jet in the gas dynamic section. The information obtained can be used in the development of gas-powder purging systems in aggregates and steel ladles, shotcrete systems and the supply of neutral gas jets when replacing oxygen flows during purging and using two-tier tuyeres.

Keywords: slag skull, degree of non-calculation, supersonic jet, boundary layer, nozzle, gas phase of converter, average mass velocity

Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-20170.

For citation: Protopopov E.V., Dumova L.V., Nozdrin I.V., Chernysheva N.A., Safonov S.O. Modeling of thermogasodynamic parameters of neutral gas jets when spreading in converter cavity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 12, pp. 843–850. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-12-843-850>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время характерной особенностью работы отечественных [1–3] и зарубежных [4–7] конвертерных цехов является постоянное использование технологии «горячих» ремонтов футеровки путем нанесения шлакового гарнисажа, получаемого при раздувке конечного шлака нейтральными газовыми струями. При этом, как правило, к основным мероприятиям повышения эффективности такой технологии относят совершенствование подготовки шлакового расплава [8–12] и конструкции гарнисажных дутьевых устройств [1–3, 7] при формировании структуры и параметров нейтральных газовых струй с обеспечением максимально возможной подводимой к шлаку энергии [13–16].

В соответствии с современными представлениями [17–20] сверхзвуковая газовая струя с умеренной нерасчетностью характеризуется развитой системой скачков уплотнения и ударных волн различной интенсивности, генерирующих к тому же и акустические волны. В то же время из-за диссипативных процессов на участках скачков давления при чередующихся во времени и пространстве разрежениях и сжатиях, а также присоединения газа из рабочего пространства конвертера, часть динамической энергии газовых струй теряется. При этом происходит искажение контуров, увеличение угла раскрытия, изменение характера распределения скоростей в сечении струи. В работах Е.А. Капустина и сотрудников, например, в работе [13], практически впервые выполнены экспериментальные исследования по определению величины присоединенной к струе массы высокотемпературного химически активного газа из рабочего пространства конвертера и оценки развития процессов в пограничном слое струи.

Целью настоящего исследования являются анализ, исследование и установление влияния относительной температуры $\theta = \frac{T_x}{T_0}$, температуры азота перед соплом t_0 и при распространении в полости конвертера t_r , расхода азота через сопло V_n на величину присоединенной массы g , осредненные значения скорости W_x и температуры T_x в произвольном сечении $\bar{x}$ сверхзвуковой нерасчетной струи на газодинамическом участке до начала взаимодействия со шлаковым расплавом в конвертере.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

В настоящей работе приняты следующие обозначения: m – массовый расход; $g = \frac{m_r}{m_i}$ – присоединенная масса; $\bar{g} = \frac{m_i}{m_i + m_r}$ и $\bar{g}_r = \frac{m_r}{m_i + m_r}$ – концентрация истекающего из сопла азота и газа в полости конвертера;

V_n – объемный расход; a и $a_{кр}$ – местная скорость звука и критическая скорость; T – термодинамическая температура; p – абсолютное давление; $\theta = \frac{T_r}{T_0}$ – относительная температура; ρ – плотность; w – средняя скорость в определенном сечении струи; $M = \frac{w}{a}$ – число Маха;

$\lambda = \frac{w}{a_{кр}}$ – приведенная скорость; $\frac{T_1}{T_0} = \tau(\lambda)$ – газодинамическая функция температуры; $n = \frac{p}{p_r}$ – степень нерасчетности истекающей струи; $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты; $C = \sqrt{1 - \left(\frac{k-1}{2} M^2\right)^{-1}}$ – число Крокко; β – коэффициент количества движения; α – коэффициент кинетической энергии; F – площадь сечения; Y_0 – начальный угол раскрытия по границе сверхзвуковой струи; $\bar{x}$ – расстояние, пройденное струей в диаметрах критического сечения сопла $d_{кр}$.

Индексы «0» и «1» обозначают параметры перед соплом и в выходном сечении сопла; «кр» – в критическом сечении сопла; «х» – в произвольном сечении истекающей газовой струи; «i» – на поверхности струи; «г» – газа в полости конвертера; индекс «н» показывает, что процесс идет в нормальных физических условиях.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

При постановке задачи учтены данные по газодинамике при формировании и течении струй, оказывающих влияние на эффективность турбулентного переноса в пограничном слое при взаимодействии с газом в полости конвертера.

Схема расчета основана на гипотезе существования идеальной границы, через которую в нейтральную газовую струю проникает химически активный газ из окружающей среды. Эта граница является условной, так как она существовала бы только в случае, если бы газовые струи и газ окружающего пространства были совершенными. Однако такая формулировка удобна как пространственный базис, каким в теории пограничного слоя является твердая стенка, относительно которой рассматривается вязкое течение при смешении газов. В такой постановке допущение состоит в том, что форма предельной границы струи предполагается цилиндрической с радиусом, равным максимальному радиусу первой бочки нерасчетной струи [21 – 25]. Тогда угол раскрытия сверхзвуковой струи при выходе из сопла можно определить по выражению

$$Y_o \approx \omega(M_1) - \omega(M_i) + \alpha, \quad (1)$$

где функция

$$\omega(M) = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctg \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} (M^2 - 1) - \arctg \sqrt{M^2 - 1}. \quad (2)$$

Максимальный радиус первой бочки нерасчетной струи составляет $\bar{r}_{\max} = 1 + \frac{Y_o}{\psi}$ (где Y_o – функция Прандтля-Майера), а ψ можно определить как

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{M_1^2 - 1}} \frac{q(M_i)}{q(M_1)}. \quad (3)$$

Газодинамическую функцию расхода газа, выраженную через число Маха M_1 , можно представить в виде

$$q(M_1) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} M_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}. \quad (4)$$

Тогда присоединенную к струе массу можно рассчитать по выражению

$$g = \frac{m_r}{m_1}, \quad (5)$$

где $m_1 = \rho_1 w_1 F_1$ – расход газа через сопло.

При постановке задачи присоединенную массу g дополнительно рассчитывали по соотношению

$$g = \frac{2\bar{r}_{\max}\bar{x}}{D\sigma} C_i (1 - C_i^2)^{1/2} (I_{1R} - I_{2R}), \quad (6)$$

где $D = \sqrt{\frac{k-1}{2}} M_1 n^{\frac{k+1}{2k}}$ – параметр, связывающий число Маха M_1 и степень нерасчетности струи n , определенную для условий выходного сечения сопла; $\sigma = 12 + 2,58 M_i$ – параметр подобия, характеризую-

щий степень турбулентности струи; $I_{1R} = \int_{-\infty}^{\eta_R} \frac{\varphi d\eta}{1 - \varphi^2 C_i^2}$,

$I_{2R} = \int_{-\infty}^{\eta_R} \frac{\varphi^2 d\eta}{1 - \varphi^2 C_i^2}$ – интегралы (при истечении холодного газа в затопленное пространство $\theta = 1$ и значения определяются графически [25]); η – безразмерная переменная в зоне смешения; R – индекс, относящийся к зоне смешения.

Степень нерасчетности струи также можно выразить через число Маха на срезе сопла M_1 и на внешней границе струи M_i

$$n = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_i^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (7)$$

При разработке модели более подробные преобразования, связанные с выражениями (5) и (6), выполнены в соответствии с работой [13].

Рассмотрим движение сверхзвуковой нерасчетной струи нейтрального газа на начальном участке от среза сопла до условного сечения x , находящегося, например, на уровне вхождения струи в шлаковый расплав. Длину так называемого газодинамического участка $\bar{x}$ при истечении струи в условно «холодный» газ можно оценить, например, по результатам работ [21, 25]. При этом следует иметь в виду, что при истечении в высокотемпературное изобарное пространство, в сравнении с «холодным», длина сверхзвукового потока будет возрастать, а значит и расстояние газодинамического участка возрастает в зависимости от температуры окружающего газа ориентировочно в 1,3 – 1,7 раза [12 – 14]. Для этого участка запишем закон постоянства количества движения

$$F_1(p_1 - p_r) + \beta \rho_1 w_1^2 F_1 = \int \rho w^2 dF + \int (p_1 - p_r) dF. \quad (8)$$

Коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения количества движения β и кинетической энергии α по сечению сверхзвуковой струи, можно определить как

$$\beta = \frac{\int_F w^2 dF}{w_{\text{кр}}^2 F};$$

$$\alpha = \frac{\int_F w^3 dF}{w_{\text{кр}}^3 F}. \quad (9)$$

После интегрирования правой части уравнения (8) можно записать

$$F_1(p_1 - p_r) + \beta \rho_1 w_1^2 F_1 = \rho_x w_x^2 F_x + (p_x - p_r) F_x. \quad (10)$$

С учетом уравнения (10) среднемассовую скорость струи на расстоянии x от среза сопла в соответствующем сечении, где статическое давление p_x уравнивается с атмосферным p_1 , рассчитывали по выражению

$$w_x = \left[\frac{p_r(n-1)}{\rho_1 w_1} + \beta w_1 \right] \frac{1}{(1+g)\beta}, \quad (11)$$

где $w_1 = \lambda_1 a_{кр}$ – скорость истечения из сопла.

Приведенную скорость λ_1 находили, используя газодинамическую функцию расхода $q(\lambda_1) = \frac{F_{кр}}{F_1}$, которая известна, так как диаметры $d_{кр}$ и d_1 определены конструкцией дутьевого устройства. При этом принимали, что $p_r = 0,1$ МПа.

Для нахождения среднемассовой температуры t_x решали уравнение теплового баланса для участка струи после выхода из сопла до определенного сечения x (игнорированием пренебрегали):

$$m_1 c_{pг} T_0 + m_1 c_{pг} T_r = (m_1 + m_r) c_{px} T_x + \frac{\alpha(m_1 + m_r) w_x^2}{2000}. \quad (12)$$

В соответствии с зависимостью (12) температуру T_x струи в сечении x представляли в виде

$$T_x = T_0 \bar{g} \frac{c_{p0}}{c_{px}} + T_r \bar{g}_r \frac{c_{pг}}{c_{px}} - \frac{\alpha w_x^2}{2000 c_{px}}. \quad (13)$$

Таким образом, в соответствии с постановкой задачи и принятой моделью по аналогии с работой [19] в дальнейшем решали систему, состоящую из 45 алгебраических уравнений, а также численно рассчитывали интегралы I_{1p} и I_{2p} в зависимости от числа Крокко.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении расчетов для условий эксплуатации 350 т конвертеров АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» использовали характеристики и параметры применяемого дутьевого устройства. Температуру азота на входе в сопло t_0 варьировали в пределах 25 – 600 °С, а температуру газа t_r в полости конвертера в условиях отсутствия металла перед раздувкой шлака – в интервале 300 – 1000 °С. Теплоемкость азота c_p в полости конвертера принимали равной 1,25 кДж/(кг·К). В случае расчетного режима истечения при $n = 1$ расход азота через одно сопло V составляет примерно 200 м³/мин.

Количество сопел в головке фурмы – 4. Диаметр сопла в критическом сечении $d_{кр}$ составляет 54 мм, во входном d_0 и выходном d_1 сечениях – 65 и 71 мм. Коэффициент количества движения 1,04, коэффициент кинетической энергии 1,3.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Присоединенную массу g рассчитывали по уравнению (6).

На рис. 1 показано влияние относительной температуры θ на изменение относительной скорости w_x/w_1 струи газа и присоединенной массы g по длине струи $\bar{x}$ при $t_0 = 30$ °С, $V_n = 200$ м³/мин, $t_r = 30 - 1500$ °С. Установлено, что чем больше относительная температура θ (больше t_r), тем меньше масса газа, присоединяемого из полости конвертера. Так, на расстоянии $\bar{x} = 20$ при $\theta = 1$ присоединенная масса g составляет 0,98, а при $\theta = 5$ – только 0,35.

Отмеченная особенность объясняется тем физическим фактом, что при увеличении значения θ плотность эжектируемой среды падает, снижается и масса подсосываемого присоединенного газа.

Как видно (рис. 1), по мере удаления от среза сопла отношение скоростей w_x/w_1 снижается при любом значении θ . Характерно, что чем больше значение θ , тем более высокотемпературным будет окружающий газ, тем меньше присоединенная масса g , и, по этой причине, отношение скоростей w_x/w_1 увеличивается. Например, при $\theta = 1$ и $\bar{x} = 30$ относительная скорость w_x/w_1 составляет 0,28, а при повышении θ до 5 значение w_x/w_1 уже составляет 0,38.

Анализ результатов расчета показывает, что масса эжектируемого газа по мере удаления от сопла по оси струи будет нарастать практически линейно. В приложении к конвертерному процессу это будет означать, что чем выше высота расположения фурмы относительно уровня жидкой ванны, тем газовая струя в месте встречи с расплавом будет более насыщена (разбавлена) окружающим газом [19, 25]. И, соответственно, наоборот.

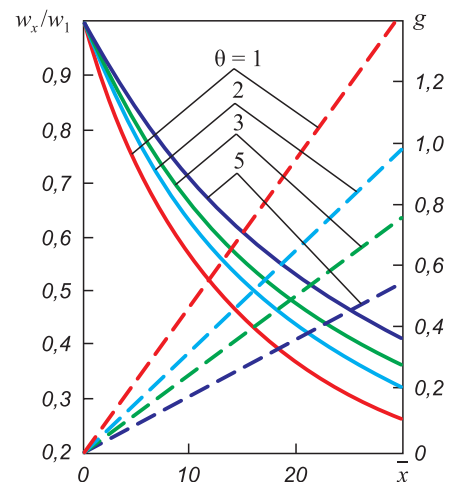


Рис. 1. Влияние относительной температуры θ на изменение относительной скорости w_x/w_1 струи газа (—) и присоединенной массы g (---) по длине струи $\bar{x}$

Fig. 1. Effect of relative temperature θ on change in relative velocity w_x/w_1 of the gas jet (—) and the attached mass g (---) along the length of the jet $\bar{x}$

рот. Накопленный экспериментальный и производственный опыт проведения операции нанесения шлакового гарнисажа показывает [1 – 3, 25], что наилучшие результаты по разбрызгиванию шлака достигаются при расположении фурмы в положении, максимально приближенном к шлаковому расплаву, то есть газодинамический участок по длине будет незначительным и эжекция в струю окружающего газа минимальной.

Несколько неожиданной является полученная зависимость величины присоединенной массы g от температуры нагрева азота t_0 , например, при использовании газоохлаждаемых (азотом) гарнисажных фурм. На рис. 2 представлены зависимости отношения скоростей w_x/w_1 и присоединенной массы g от температуры азота на входе в сопло t_0 при различном удалении $\bar{x}$ от среза сопла при $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $V_n = 200\text{ м}^3/\text{мин}$, $t_r = 30 - 1500^\circ\text{C}$.

Расчетные данные показывают, что при удалении от среза сопла при любом значении t_0 присоединенная масса увеличивается. С повышением температуры t_0 присоединенная масса, казалось бы, должна расти. Однако, с увеличением степени нагрева азота перед соплом при $m = \text{const}$ и появлением дополнительного теплового сопротивления давление p_0 также возрастает, что в конечном счете приводит к снижению присоединенной к струе массы. Например, при повышении температуры азота на входе в сопло с 30 до 600°C при распространении струи на расстоянии 20 калибров присоединенная масса уменьшается с 0,32 до 0,23. При этом относительная скорость w_x/w_1 возрастает с 0,54 до 0,58.

На рис. 3 приведены зависимости температуры t_x и скорости w_x от температуры газа в полости конвертера t_r на различном удалении $\bar{x}$ от среза сопла при $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $V_n = 200\text{ м}^3/\text{мин}$, $t_r = 30 - 1500^\circ\text{C}$. При увеличении t_r температура t_x возрастает, причем весьма существенно.

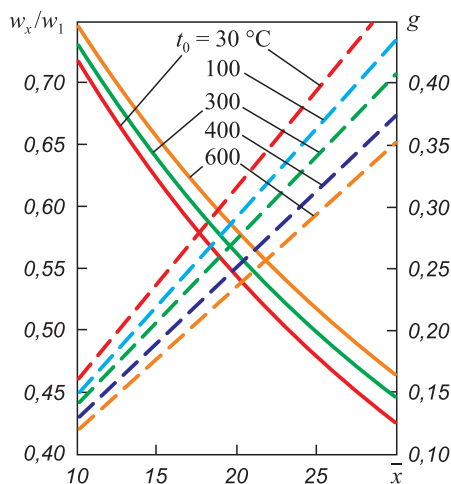


Рис. 2. Зависимости отношения скоростей w_x/w_1 (—) и присоединенной массы g (---) от температуры азота на входе в сопло t_0 при различном удалении $\bar{x}$ от среза сопла

Fig. 2. Dependences of the velocity ratio w_x/w_1 (—) and the attached mass g (---) on nitrogen temperature at the nozzle inlet t_0 at different distances $\bar{x}$ from the nozzle cutoff

Так, например, если t_x увеличивается с 600 до 1000°C , то на расстоянии 20 калибров температура t_r возрастает со 170 до 270°C . Скорость струи w_x с увеличением t_r повышается, так как струя попадает в более высокотемпературное пространство, а плотность окружающей среды снижается и при тех же условиях газовая струя, не встречая значительного сопротивления, ускоряется с 210 до 310 м/с .

Расход газа V_n увеличивается за счет повышения давления и по этой причине присоединенная масса в одном и том же сечении струи будет меньше (рис. 4). Тогда температура t_x также будет снижаться, а скорость

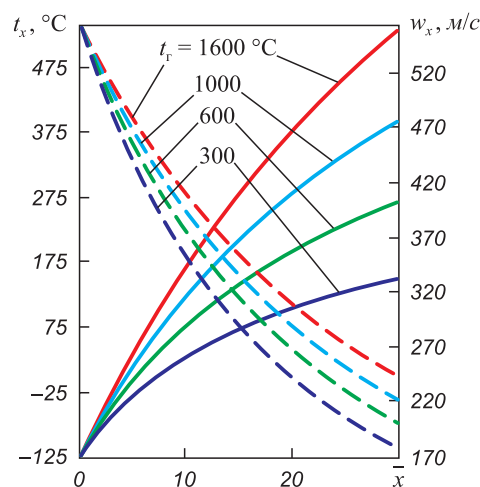


Рис. 3. Зависимости температуры t_x (—) и скорости w_x (---) от температуры газа в полости конвертера t_r на различном удалении $\bar{x}$ от среза сопла

Fig. 3. Dependences of temperature t_x (—) and velocity w_x (---) on temperature of the gas in converter cavity t_r at different distance $\bar{x}$ from the nozzle cutoff

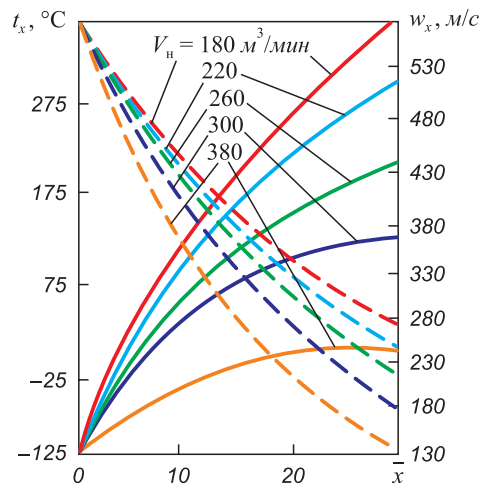


Рис. 4. Изменение температуры t_x (—) и скорости w_x (---) на расстоянии $\bar{x}$ от среза сопла при различном расходе через сопло V_n при $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $V_n = 200\text{ м}^3/\text{мин}$, $t_r = 30 - 1500^\circ\text{C}$

Fig. 4. Change in temperature t_x (—) and velocity w_x (---) at a distance $\bar{x}$ from the nozzle cutoff at different flow rates through the nozzle V_n at $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $V_n = 200\text{ м}^3/\text{мин}$, $t_r = 30 - 1500^\circ\text{C}$

w_x с увеличением расхода V_n возрастать. Например, на расстоянии 20 калибров и при увеличении расхода газа V_n со 180 до 360 м³/мин температура газа будет возрастать с 270 до 542 °С, а скорость – с 200 до 330 м/с.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Совершенно очевидно, что подтвердить численные расчеты проведением прямых промышленных экспериментов на конвертерах емкостью 350 т не представляется возможным, поэтому допустимо использование метода тестовой проверки достоверности полученной модели. Так, например, подтверждается, что:

– на срезе сопла ($\bar{x} = 0$) присоединения окружающего газа нет ($g = 0$) и $w_x/w_1 = 1$ при любых значениях θ и t_0 (см. рис. 1, 2);

– если $\bar{x} = 0$, то $w_x = w_1 = \lambda_1 a_{кр}$, а $t_x = t_1 = -120$ °С, что также следует из выражения $T_1 = T_0 \tau(\lambda)$ (см. рис. 3);

– если $\bar{x} = 0$ и $t_x = t_1 = -120$ °С, то $w_x = w_1 = \lambda_1 a_{кр}$;

– чем больше расстояние от среза сопла прошла газовая струя, тем больше независимо от t_0 , t_r , V_n скорость струи w_x снижается, а t_x возрастает, что соответствует физической картине присоединения горячего газа окружающей среды к струе любой структуры.

ВЫВОДЫ

Проведено численное моделирование параметров струи нейтрального газа при распространении в полости конвертера в условиях отсутствия металла на участке до начала взаимодействия со шлаковым расплавом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Мокринский А.В., Лаврик А.Н., Соколов В.В., Протопопов Е.В., Чернышев А.Г. Перспективные направления продления срока службы футеровки конвертеров // *Сталь*. 2004. № 5. С. 40–44.
2. Протопопов Е.В., Галиуллин Т.Р., Чернышев А.Г., Соколов В.В. Разработка конструкции гарнисажных фурм и технологии газопорошкового ошлакования 350-т конвертеров Западно-Сибирского металлургического комбината // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2009. № 9. С. 34–39.
3. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Галиуллин Т.Р., Чернышев А.Г., Чубина Е.А. Новое направление в совершенствовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2006. № 12. С. 7–12.
4. Sian C., Wenyan Y., Conglie Z. Slag splashing for Bao Steel's 300 metric ton BOF and crystallographic structure of its slag // *Iron and Steelmaker*. 2000. Vol. 27. No. 7. P. 39–41.
5. Lin L., Xiaoyan P., Fei G., Hewei D. Improvement and maintenance of MgO-C bottom-blowing tuyere in BOF converter for prolonging service life. In: *Proceedings of the Unified Int. Tech. Conf. on Refractories*. Chapter 124. UNITECR. 2013. P. 721–725. <https://doi.org/10.1002/9781118837009.ch124>
6. Sarkar S., Pal T.K., Ghosh N.K., Garai S.K., Chintiaha P., Kujur M.K., Mishra A.N., Datta P.K. Enhancement of BOF productivity through modification of hot metal transfer ladle lining at Durgapur steel plant // *SEAIISI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute)*. 2009. Vol. 38. No. 1. P. 39–42.
7. Zhaslan R.K., Zhautikov B.A., Romanov V.I., Aikeyeva A.A., Yerzhanov A.S. Improvement of methods for semi-finished carbon product tapping from the basic oxygen furnace (BOF) // *Metallurgija*. 2022. Vol. 61. No. 1. P. 203–205.
8. Высокомagneзиальные флюсы для сталеплавильного производства / К.Н. Демидов, Т.В. Борисова, А.П. Возчиков и др. Москва: Завод брикетированных материалов, 2013. 280 с.
9. Barron M.A., Hilerio I. Numerical analysis of slag splashing in a steelmaking converter // *Computer Technology and Application*. 2011. Vol. 2. No. 9. P. 828–834.
10. Slovikovskii V.V., Gulyaeva A.V. Creation of high-efficiency promising refractory materials and constructions for the lining of metallurgical units // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 58. No. 5. P. 475–480. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0130-7>
11. Cong I.G., Wei Y., Zhang Y., Peng F. Practice of dolomite slag replenishment technology on large face of converter // *Naihuo Cailiao/Refractories*. 2020. Vol. 54. No. 3. P. 243–245. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1935.2020.03.014>
12. Kumar D.S., Prasad G., Wishwanath S.C., Ghorui P.K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal J.P.N. Converter life enhancement through
1. Mokrinskii A.V., Lavrik A.N., Sokolov V.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Prolongation of service life of lining of converter. *Stal'*. 2004, no. 5, pp. 40–44. (In Russ.).
2. Protopopov E.V., Galiullin T.R., Chernyatevich A.G., Sokolov V.V. Development of design of skull tuyeres and technology of gas-powder slagging of 350-ton converters of the West Siberian Metallurgical Combine. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2009, no. 9, pp. 34–39. (In Russ.).
3. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Galiullin T.R., Chernyatevich A.G., Chubina E.A. A new direction in improving the technology of applying slag skull to the converter lining. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 12, pp. 7–12. (In Russ.).
4. Sian C., Wenyan Y., Conglie Z. Slag splashing for Bao Steel's 300 metric ton BOF and crystallographic structure of its slag. *Iron and Steelmaker*. 2000, vol. 27, no. 7, pp. 39–41.
5. Lin L., Xiaoyan P., Fei G., Hewei D. Improvement and maintenance of MgO-C bottom-blowing tuyere in BOF converter for prolonging service life. In: *Proceedings of the Unified Int. Tech. Conf. on Refractories*. Chapter 124. UNITECR. 2013. P. 721–725. <https://doi.org/10.1002/9781118837009.ch124>
6. Sarkar S., Pal T.K., Ghosh N.K., Garai S.K., Chintiaha P., Kujur M.K., Mishra A.N., Datta P.K. Enhancement of BOF productivity through modification of hot metal transfer ladle lining at Durgapur steel plant. *SEAIISI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute)*. 2009, vol. 38, no. 1, pp. 39–42.
7. Zhaslan R.K., Zhautikov B.A., Romanov V.I., Aikeyeva A.A., Yerzhanov A.S. Improvement of methods for semi-finished carbon product tapping from the basic oxygen furnace (BOF). *Metallurgija*. 2022, vol. 61, no. 1, pp. 203–205.
8. Demidov K.N., Borisova T.V., Vozchikov A.P., etc. *High-Magne-sian Fluxes for Steelmaking*. Moscow: Briquetted Materials Plant, 2013, 280 p. (In Russ.).
9. Barron M.A., Hilerio I. Numerical analysis of slag splashing in a steelmaking converter. *Computer Technology and Application*. 2011, vol. 2, no. 9, pp. 828–834.
10. Slovikovskii V.V., Gulyaeva A.V. Creation of high-efficiency promising refractory materials and constructions for the lining of metallurgical units. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018, vol. 58, no. 5, pp. 475–480. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0130-7>
11. Cong I.G., Wei Y., Zhang Y., Peng F. Practice of dolomite slag replenishment technology on large face of converter. *Naihuo Cailiao/Refractories*. 2020, vol. 54, no. 3, pp. 243–245. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1935.2020.03.014>
12. Kumar D.S., Prasad G., Wishwanath S.C., Ghorui P.K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal J.P.N. Converter life enhancement through

- optimization of operation practices // *Ironmaking and Steelmaking*. 2007. Vol. 34. No. 6. P. 521–528.
<https://doi.org/10.1179/174328107X203903>
13. Баланин Б.А., Зеленков О.С., Капустин Е.А., Куземко Р.Д. Исследование присоединенной массы сверхзвуковой струи на газодинамическом участке. В кн.: Теплообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов. Москва: Металлургия, 1975. С. 19–35.
 14. Капустин Е.А., Куземко Р.Д., Кузнецов А.Ф., Шам П.И., Большаков В.А. Возможности повышения производительности действующих кислородных конвертеров // *Сталь*. 1972. № 2. С. 112–115.
 15. Tiedje N.S. Solidification, processing and properties of ductile cast iron // *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. No. 5. P. 505–514. <https://doi.org/10.1179/026708310X12668415533649>
 16. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking. I. Jet design and characteristics // *Iron and Steel*. 1976. Vol. 45. No. 69. P. 627–634.
 17. Tabata Y., Marsh R.S., Kelly P., etc. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles. In book: *Steel Making Conference Proceedings*. 1998. P. 451–457.
 18. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. Москва: Металлургия, 1974. 495 с.
 19. Протопопов Е.В., Чернышев А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996. № 10. С. 5–9.
 20. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. Москва: Металлургия, 1987. 256 с.
 21. Вурцбах Р. Характеристика свободных струй, истекающих из дутьевых сопел // *Черные металлы*. 1967. № 10. С. 12–20.
 22. Kapner J.D., Li K., Larson R.H. An experimental study of mixing phenomena of turbulent supersonic jets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1970. Vol. 13. No. 5. P. 932–937.
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90138-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90138-9)
 23. Sharma S.K., Hlinka J.W., Kern D.W. The bath circulation jet penetration and high – temperature reaction zone in BOF steelmaking // *Steelmaking Proceedings*. 1977. Vol. 60. P. 181–197.
 24. Явойский В.И., Явойский А.В., Сизов А.М. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. Москва: Металлургия, 1985. 176 с.
 25. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Киев-Донецк: Вища школа, 1984. 344 с.
 - optimization of operation practices. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, no. 6, pp. 521–528.
<https://doi.org/10.1179/174328107X203903>
 13. Balanin B.A., Zelenkov O.S., Kapustin E.A., Kuzemko R.D. Investigation of the attached mass of a supersonic jet at gas-dynamic section. In: *Heat and Mass Transfer Processes in Baths of Steelmaking Units*. Moscow: Metallurgiya, 1975, pp. 19–35. (In Russ.).
 14. Kapustin E.A., Kuzemko R.D., Kuznetsov A.F., Sham P.I., Bol'shakov V.A. Possibilities of increasing the productivity of existing oxygen converters. *Stal'*. 1972, no. 2, pp. 112–115. (In Russ.).
 15. Tiedje N.S. Solidification, processing and properties of ductile cast iron. *Materials Science and Technology*. 2010, vol. 26, no. 5, pp. 505–514. <https://doi.org/10.1179/026708310X12668415533649>
 16. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking. I. Jet design and characteristics. *Iron and Steel*. 1976, vol. 45, no. 69, pp. 627–634.
 17. Tabata Y., Marsh R.S., Kelly P., etc. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles. In: *Steel Making Conference Proceedings*. 1998, pp. 451–457.
 18. Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *Theory of Purging a Steel-making Bath*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 495 p. (In Russ.).
 19. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Investigation of interaction of oxygen jets with waste converter gases. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.).
 20. Sizov A.M. *Gas Dynamics and Heat Exchange of Gas Jets in Metallurgical Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 256 p. (In Russ.).
 21. Vurtsbakh R. Characteristics of free jets flowing out from blow nozzles. *Chernye metall'y*. 1967, no. 10, pp. 12–20. (In Russ.).
 22. Kapner J.D., Li K., Larson R.H. An experimental study of mixing phenomena of turbulent supersonic jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1970, vol. 13, no. 5, pp. 932–937.
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90138-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90138-9)
 23. Sharma S.K., Hlinka J.W., Kern D.W. The bath circulation jet penetration and high – temperature reaction zone in BOF steelmaking. *Steelmaking Proceedings*. 1977, vol. 60, pp. 181–197.
 24. Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V., Sizov A.M. *The Use of Pulsating Blast in Steelmaking*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 176 p. (In Russ.).
 25. Baptizmanskii V.I., Medzhibozhskii M.Ya., Okhotskii V.B. *Converter Processes in Steelmaking*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1984, 344 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

ORCID: 0000-0002-7554-2168

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Любовь Валерьевна Думова, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: doumova@bk.ru

Наталья Анатольевна Чернышева, доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: chernysheva_na@rambler.ru

Игорь Викторович Ноздрин, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Сергей Олегович Сафонов, аспирант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

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

Lyubov' V. Dumova, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: doumova@bk.ru

Natal'ya A. Chernysheva, Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: chernysheva_na@rambler.ru

Igor' V. Nozdrin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. of the Chair of Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Sergei O. Safonov, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Е. В. Протопопов – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, подготовка текста.

Л. В. Думова – анализ и обобщение полученных результатов моделирования.

И. В. Ноздрин – разработка математической модели, определение граничных условий.

Н. А. Чернышева – графическое оформление полученных результатов.

С. О. Сафонов – техническое обоснование задач исследования, обоснование параметров процесса.

E. V. Protopopov – formation of the concept, goal and objectives of the study; writing the text.

L. V. Dumova – analysis and generalization of the obtained modeling results.

I. V. Nozdrin – development of a mathematical model, determination of boundary conditions.

N. A. Chernysheva – graphic design of the obtained results.

S. O. Safonov – technical justification of the research tasks, justification of the process parameters.

Поступила в редакцию 22.06.2022

После доработки 29.08.2022

Принята к публикации 12.09.2022

Received 22.06.2022

Revised 29.08.2022

Accepted 12.09.2022