

**Bibliography:**

1. Dyudkin D.A. Quality of continuous steel billet / D.A. Dyudkin. – Kiev: Technology, 1988. – 253 p. (Rus.)
2. Continuous casting process: monograph / A.N. Smirnov [et al.]. – Donetsk: Donetsk National Technical University, 2002. – 536 p. (Rus.)
3. Smirnov A.N. Continuous casting: Textbook / A.N. Smirnov, S.V. Kuberskiy, E.V. Stepan. – Donetsk: Donetsk National Technical University, 2011. – 482 p. (Rus.)
4. Gulyaev B.B. Solidification and heterogeneity of steel / B.B. Gulyaev. – Moscow: Metallurgizdat, 1950. – 228 p. (Rus.)
5. Bachner E. Terms of solidification and temperature field in the crystallizer CCP / E. Bachner, M. Ussar // Chernye Metally. – 1976. – №5. – P. 3-9. (Rus.)
6. Makurov S.L. New complex method of steel ingot solidification research / S.L. Makurov, D.V. Silkin // Reporter of the Priazovskiy state technical university. Section: Technical sciences : Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – Mariupol, 2014. – Issue 28. – P. 43-47. (Rus.)
7. Kazachkov E.A. Crystallization kinetics of killed and semi-killed steel large ingots / E.A. Kazachkov, N.I. Revtov, V.A. Fedorov // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya. – 1973. – №9. – P. 3-9. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 26.03.2015

УДК: 669.184

© Харлашин П.С.,<sup>1</sup> Синельников В.О.<sup>2</sup>, Ассиил Кадхим Мохаммед<sup>3</sup>

**К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ  
КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРОВ**

*Предложены модели газоохлаждаемой фурмы процессов факельного торкретирования и разбрызгивания остаточного шлака в кислородном конвертере. Представлены расчёты, позволяющие снизить расход кислорода, необходимого для образования высокотемпературного факела горения, а также упростить конструкцию фурменного устройства.*

**Ключевые слова:** факельное торкретирование, раздувка шлака, газоохлаждаемая фурма, кислородный конвертер, шлаковый гарнисаж.

*Харлашин П.С., Синельников В.О., Ассиил Кадхим Мохаммед. До питання про підвищення стійкості футеровки кисневих конвертерів. Запропоновано моделі газоохолоджувальної фурми процесів факельного торкретування та розбризкування залишкового шлаку в кисневому конвертері. Представлені розрахунки дозволяють знизити витрату кисню, необхідного для утворення високотемпературного факелу горіння, а також спростити конструкцію фурменого пристрою.*

**Ключові слова:** факельне торкретування, роздувка шлаку, газоохолоджувальна фурма, кисневий конвертер, шлаковий гарнісаж.

**P.S. Kharlashin, V.O. Sinelnikov, Assiil Kadhim Mohammed. On maximizing oxygen converters lining life. Guniting and residual slag spraying in an oxygen converter, gas-cooled tuyeres of several patterns have been offered. The calculations to reduce oxygen**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь  
<sup>2</sup> аспірант, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь,  
[Victoriano@online.ua](mailto:Victoriano@online.ua)

<sup>3</sup> аспірант, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь

*consumption required for lancing, as well as to simplify the tuyere design have been made. Systems of differential and integral equations have been used to calculate such factors and physical actions as powder concentration, duct length and power influence, suspension of matter in gas velocity relation over the area of high temperatures. Experiments have shown that substitution of the gas-cooled tuyere for the water-cooled tuyere converts the tuyere into a heat exchanger making it possible to use the energy formerly lost as a result of dissipative losses. The results of this work can be used to improve existing and new advanced technologies that reduce emissions into the environment.*

**Keywords:** torch spraying, blowing slag, temperature gas-cooled lance, oxygen converter, slag skull.

**Постановка проблеми.** В настоящее время одним из самых важных направлений в сферах энерго- и ресурсосбережения кислородно-конвертерных цехов является продление срока службы агрегатов.

Проблема срока службы футеровки кислородных конвертеров давно известна. В 350-т конвертерах толщина футеровки составляет ~ 900 мм, а её износ, за одну плавку, достигает 1 мм. Для перефутеровки затрачивается 260 – 900т. дорогостоящих периклазоуглеродистых огнеупоров. Стоимость такой операции составляет ~ 1 млн. \$, что существенно влияет на себестоимость стали.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1, 2] были рассмотрены методы совместного использования технологий факельного торкретирования и разбрызгивания шлака инертным газом. Однако, как показал литературный обзор зарубежной литературы, достичь таких успехов, как в США и Канаде – 30-43 тыс. плавков без перефутеровки [3-6], отечественным металлургическим предприятиям не удалось.

В настоящее время рекордные показатели на территории Украины не превышают 6 тыс. плавков без перефутеровки.

При этом ведущие специалисты бывшего СНГ одной из самых перспективных считают технологию, когда фурма является газоохлаждаемой, однако и здесь существует ряд неразрешённых вопросов.

**Цель работы** – показать, как при превращении торкрет-фурмы и фурмы для раздувки шлака в теплообменник, эффективно используется ранее теряемая в окружающую среду теплота, а также разработать рекомендации по повышению эффективности процесса.

**Изложение основного материала.** Конструктивно торкрет – фурма представляет собой систему нескольких вложенных друг в друга длинных труб. Подготовленная торкрет – масса подается, как правило, к водоохлаждаемой фурме, которая находится в высокотемпературной области конвертера. В нижней части торкрет-фурмы имеются несколько уровней сопел, через которые истекают струи газозвеси и кислорода (рис. 1). Затем торкрет – фурму опускают в конвертер и подают кислород с расходом  $V_n = 280 - 300 \text{ м}^3/\text{мин}$ , давление кислорода  $p \approx 1,6 \text{ МПа}$ . Образуется факел горения и порошок подаётся в размягченном виде на ремонтируемую огнеупорную поверхность.

Если подводящие и отводящие воду трубопроводы убрать, как сделано в [7-9], то газозвесь нагревается от нагретого корпуса фурмы за счет конвективного теплового потока, передаваемого стенкой несущему газу (рис. 1). Из-за термического сопротивления температура  $t_{12}$  газозвеси будет всегда ниже, чем температура  $t_w$  стенки корпуса фурмы.

На ОАО «МК «Азовсталь» для раздувки шлака в конвертере использовали не штатную кислородную фурму, а специальную азотную. В таких технологических условиях её корпус может быть не водоохлаждаемым, а газоохлаждаемым – движущимся по фурме азотом (рис. 2). Кроме упрощения конструкции – нет необходимости иметь два металлорукава для подвода и отвода воды – фурма в сильно разогретой полости конвертера становится теплообменником. Если применяют фурму двухцелевого назначения – для нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования, то азот, подаваемый по газоохлаждаемой фурме, можно перед соплами нагревать вплоть до  $t_o = 400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , тем самым обеспечивая регенерацию теплоты уходящих газов с целью увеличения мощности и импульса втекающих в шлаковый расплав струй.

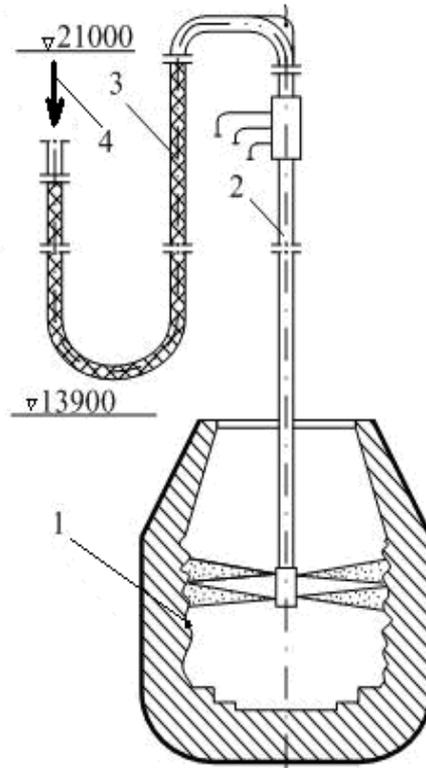


Рис. 1 – Схема факельного торкретирования футеровки кислородного конвертера:  
 1 – футеровка; 2 – торкрет-фурма; 3 – гибкий металлорукав; 4 – подача газозвеси

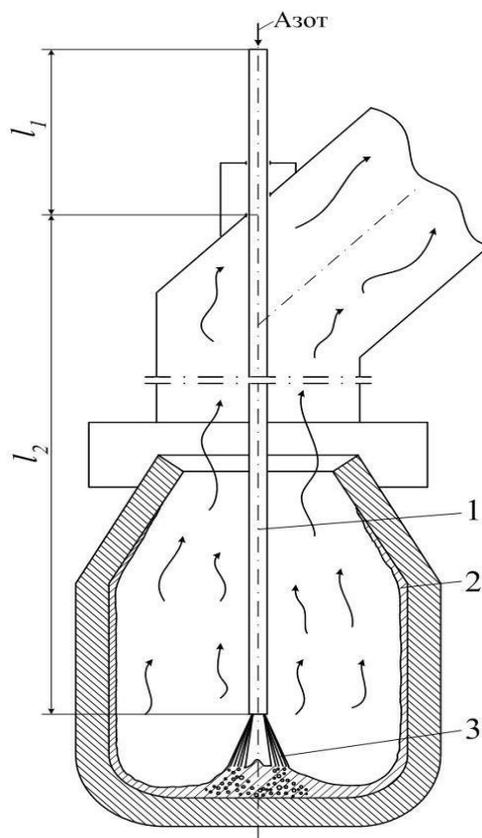


Рис. 2 – Схема раздувки шлака в полости конвертера: 1 – продувочная азотная фурма; 2 – слой шлака; 3 – сверхзвуковая нерасчётная струя

Если же для горячего ремонта футеровки используется только факельное торкретирование (ПАО «ММК им. Ильича»), то эту технологическую операцию можно совместить с нагревом лома. В этом случае в пустой конвертер заваливают лом, а сверху его засыпают углем. Уголь проникает в бесформенную массу лома, от теплоты торкрет-факела происходит его зажигание и объемное горение. Использование части ранее теряемой теплоты факела для интенсификации нагрева лома улучшает тепловой баланс следующей плавки.

**Математическая модель 1-го эксперимента.** Представим в односкоростном, однотемпературном, равновесном приближении систему уравнений для газодисперсного потока, перемещающегося в фурме с учётом уменьшения расхода  $G_{12}$  смеси по длине канала, которые имеют вид:

– уравнение движения

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{d}{dx}(G_{12}w_{12}) - F_w - \chi w_{12} + \rho_{12}g \sin \alpha ; \quad (1)$$

– уравнение сохранения полной энергии

$$w_{12} \frac{dp}{dx} = -\frac{d}{dx}(G_{12}c_p T) + Q_w - \chi c_{p12} T ; \quad (2)$$

– уравнение неразрывности

$$G_{12} = r_{12}w_{12} \quad dG_{12} / dx = -\chi ; \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3) обозначены:  $p$  – статическое давление, Па;  $G_{12}$  – приведенный расход газозвеси, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $\chi$  – интенсивность уменьшения расхода смеси по длине канала, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $w_{12}$ ,  $\rho_{12}$ ,  $c_{p12}$  – скорость (м/с), плотность (кг/м<sup>3</sup>), теплоёмкость равновесной газодисперсной смеси (Дж/кг·К);  $F_w$  – приведенная сила трения при взаимодействии газодисперсного потока со стенками канала, Н/м<sup>3</sup>;  $Q_w$  – интенсивность подвода теплоты от стенки к газодисперсной среде, передаваемой конвекцией, Вт/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $x$  – координата.

При движении смеси мимо сопловых отверстий в канале

$$\chi = n_i G_i / D , \quad (4)$$

где  $n_i$  – количество сопел на  $i$ -том уровне.

Силу  $F_w$ , обусловленную трением о стенку при течении газозвеси в фурме, определяли по формуле Дарси-Вейсбаха

$$F_w = \zeta_{12} \rho_{12} w_{12}^2 / (2D) = \zeta_{12} G w_{12} / (2D); \quad \zeta_{12} = \zeta_1 + \zeta_2 . \quad (5)$$

Коэффициент гидравлических потерь  $\zeta_1$ , учитывающий трение газа о стенки канала, вычислили по формуле Альтшуля

$$\zeta_1 = 0,11(\Delta / D + 68 / \text{Re}_{12})^{0,5}; \quad \text{Re}_{12} = D w_{12} \rho_1 / \eta , \quad (6)$$

где  $\Delta$  – высота выступов шероховатости, м;  $D$  – диаметр трубы, м;  $\rho_1$  – плотность несущего газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с.

Коэффициент гидравлических потерь  $\zeta_2$ , учитывающий трение порошка о стенку канала, находили по формуле Михаелидиса.

Интенсивность теплообмена несущей среды со стенкой канала определяли по уравнению

$$Q_w = 4St \rho_{12} c_p w_{12} (T_w - T_1) / D , \quad (7)$$

где критерий  $St = Nu / (\text{RePr})$  для высокоскоростных дозвуковых течений вычисляли по формуле Гухмана

$$St = 0,0167(\text{Re}_{12} \text{Pr}_{12})^{-0,18} (T_{01} / T_w)^{0,35} . \quad (8)$$

Для решения системы уравнений (1 – 3) задавали граничные условия: на входе в фурму ( $x = 0$ ) – расходы обеих фаз  $G_{12} = G_1 + G_2$ , температура  $T_{01}$ ; на выходе ( $x = l$ ) – противодавление  $p_{o.c.}$  перед соплами.

**Математическая модель 2-го эксперимента.** Азотная сверхзвуковая нерасчетная струя истекает из сопла Лаваля в разогретое пространство полости кислородного конвертера и эжектирует окружающий газ. В каждом контрольном сечении истекающей струи под присоединённой массой понимают отношение массового расхода газа  $m_T$  из полости конвертера к массово-

му расходу газа  $m_l$ , вдуваемого через сопло фурмы:

$$g = m_G / m_l. \quad (9)$$

В рамках теории смешения Чепмена–Корста можно выполнить расчёт присоединения окружающего газа полости конвертера на всём газодинамическом участке, где существует волновая структура, то есть до встречи струи со шлаком. При составлении настоящей расчётной методики приняты следующие допущения: азот в пределах продувочного сопла ускоряется без трения, присоединённая масса шлака из полости конвертера к струе не учитывается, течение в струе близко к изобарному. При рассмотрении течения в зоне смешения струи используют две ортогональные криволинейные системы координат  $S, N$  и  $x, y$ , начало которых совмещено с кромкой сопла. Ось  $S$  направлена вдоль идеальной границы струи. В зоне смешения градиент давления отсутствует, профили скоростей подобны и описываются соотношением

$$\frac{w}{w_i} = \varphi(\eta) = 0,5(1 + \operatorname{erf}\eta), \quad (10)$$

где  $\operatorname{erf}\eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt$  – интеграл вероятности, который берут из таблиц.

Приведенную температуру обозначают как

$$\varphi(\eta) = \frac{T_0 - T_\Gamma}{T_{i0} - T_\Gamma},$$

где  $\eta = \sigma(y/x)$  – безразмерная переменная в зоне смешения;  $\sigma = 12+2,58 M_i$  – параметр подобия, зависящий от числа Маха  $M_i$  на границе.

При переходе к режимам истечения с учетом присоединения струей шлака параметр турбулентного смешения  $\sigma$  следует уточнить.

В случае плоского течения в зоне смешения массовый присоединенный расход газа можно представить как

$$m_r = 2\pi r_i \int_{-\infty}^{y_i} \rho w dy, \quad (11)$$

где  $r_i$  – радиус, отсчитанный от оси  $x$  до границы струи,  $\rho w$  – плотность тока в контрольном сечении струи.

Уравнение неразрывности, записанное для выходного сечения сопла площадью  $F_1$

$$m_1 = r_1 w_1 F_1 \quad (12)$$

легко преобразовать к виду

$$m = D(1 - C_i^2)^{1/2} F_1 \rho_i w_i / C_i, \quad (13)$$

где параметр, связывающий степень нерасчетности  $n$  и число Маха  $M_1$  на срезе сопла

$$D = ((k-1)/2)^{1/2} M_1 n^{\frac{k+1}{2k}}.$$

Из равенства давлений торможения на срезе сопла и на границе струи следует, что величина  $\lambda_i$  с заданными параметрами  $\lambda_1$  и  $n$  связаны соотношением

$$n = \frac{p_1}{p_i} = \frac{\pi(\lambda_1)}{\pi(\lambda_i)} = \left( \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (14)$$

В формулах (11) – (14) и далее  $\rho_l$  – плотность газа,  $\pi(\lambda) = p/p_0$ ,  $t(t) = T/T_0$  – газодинамические функции давления и температуры.

Подставив полученные выражения в (9), получим

$$g = \frac{2pr_i}{DF_1} \frac{C_i}{(1 - C_i^2)^{1/2}} \int_0^{y_i} \frac{rw}{r_i w_i} dy_i, \quad (15)$$

где  $y_i$  – координата линии тока постоянной массы.

Согласно сделанному выше допущению

$$r_i = r_{\max},$$

где  $r_{\max}$  – максимальный радиус первой “бочки” струи, а согласно принятым допущениям  $P_i = P_{\Gamma}$ .

Перейдём к переменной  $\eta$  и отнесём все линейные размеры к радиусу критического сечения сопла  $r_{кр}$ . Тогда формула (15), характеризующая долю массы газа, эжектируемой из полости конвертера сверхзвуковой нерасчетной струей (присоединённая масса), принимает вид

$$g = \frac{2\bar{r}_{\max}\bar{x}}{Ds} C_i (1 - C_i^2)^{1/2} \int_{-\infty}^{\eta_R} \frac{f dh}{q + f(1 - q) - f^2 C_i^2}, \quad (16)$$

где в (16) интеграл можно представить как разность двух интегралов  $I_{1R}$  и  $I_{2R}$ :

$$I_{1R} = \int_{-\infty}^{\eta_R} \frac{\varphi d\eta}{\theta + \varphi(1 - \theta) - \varphi^2 C_i^2}; \quad I_{2R} = \int_{-\infty}^{\eta_R} \frac{\varphi^2 d\eta}{\theta + \varphi(1 - \theta) - \varphi^2 C_i^2}.$$

В формуле (16)  $\bar{x} = x/r_{кр}$  – расстояние от критического сечения сопла в калибрах до контрольного сечения вдоль оси струи,  $\theta = T_{\Gamma}/T_0$  – относительная температура,  $R$  – индекс, относящийся к внутренней границе зоны смешения.

**Исходные данные 1-го эксперимента.** Численные расчёты были проведены применительно к торкрет-фурме 160 т конвертера ПАО «ММК им. Ильича» по следующим исходным данным: эквивалентный диаметр частиц, их плотность и теплоёмкость были равны  $\delta_2 = 0,1$  мм,  $\rho_2 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_2 = 0,7$  кДж/(кг·К), гидравлический диаметр трубы торкрет-фурмы  $D = 90$  мм, длина обогреваемой части фурмы  $l = 10$  м, внутренний диаметр сопла  $D_0 = 38$  мм, эквивалентная шероховатость трубы фурмы  $\Delta = 0,05$  мм, коэффициент потерь Михаелидиса  $K = 0,058$ . Рассматривали два способа регулирования концентрации  $\mu$ . По первому способу принимали, что расход несущего газа ( $N_2$ ) составлял  $V_n = 480$  м<sup>3</sup>/ч, а расход порошка изменяли в диапазоне  $m_2 = 200 - 800$  кг/мин, чему соответствовала массовая концентрация  $\mu = 20 - 80$  кг/кг. По второму способу расход несущего газа изменяли в диапазоне  $V_n = 240 - 480$  м<sup>3</sup>/ч, а расход порошка был равен  $m_2 = 400$  кг/мин. (рис. 3, 4).

**Исходные данные 2-го эксперимента.** Температуру торможения азота на входе в сопло изменяли в пределах  $t_0 = 25 - 600$ °С, температуру газов ( $N_2$ ) в полости конвертера – в интервале  $t_{\Gamma} = 300 - 1500$ °С. Теплоёмкость азота в окружающей среде (полость конвертера) принимали равной  $c_p = 1,25$  кДж/(кг·К). При расчётном режиме ( $n = 1$ ) расход азота через одно сопло составлял  $V_n = 210$  м<sup>3</sup>/мин. Диаметр сопла был равен в критическом  $d_{кр} = 47$  мм и выходном сечении  $d_1 = 69$  мм.

**Результаты расчета и их анализ.** Подтверждением правильности расчетов с использованием рассмотренной математической модели являются результаты, представленные на рисунке 3. Например, если фурма выполнена с несколькими уровнями отвода расхода газозвеси, то параметры в сопловом блоке с несколькими горизонтами вывода порошка не будут подчиняться известным закономерностям для случая с постоянным расходом  $m_{12}$ . Например, при  $t_w = 700$ °С на участке  $l$  от 8 м до 10,3 м газодисперсная смесь ускоряется, а затем происходит резкое падение скорости с максимального значения – 64,4 м/с до 44,7 м/с, а во втором уровне, которое отстоит от предыдущего на 61 мм скорость падает с 48 м/с до 12,1 м/с и т.д. (рис. 3).

Если же температура стенки  $t_w$  снижается с 700°С до 30°С, то падение скорости произойдет с 29,2 м/с до 18,4 м/с. Именно в этом заключается ценность модели. Никакие интегральные методы расчета, например, с использованием уравнения Бернулли, не позволили бы зафиксировать резкое снижение скорости газозвеси  $w_{12}$  за счет вывода ее части на 2 – 3 уровнях (рис. 3).

Из рисунка 3 следует, что с повышением температуры  $t_w$  стенки газозвесь интенсивно нагревается, ее плотность  $\rho_{12}$  падает и выполнение уравнения неразрывности  $m_{12} = \rho_{12} w_{12} f = \text{const}$ , потребует повышения давления  $p$  по всей длине  $l$ . Например, увеличение температуры  $t_w$  с 30°С до 700°С приводит к необходимости повысить давление  $p$  на входе в фурму с 0,46 МПа до 0,82 МПа. Это объясняется тем, что с нагревом псевдогаза возникает дополнительное, так называемое тепловое сопротивление, для преодоления которого требуется более высокое давление.

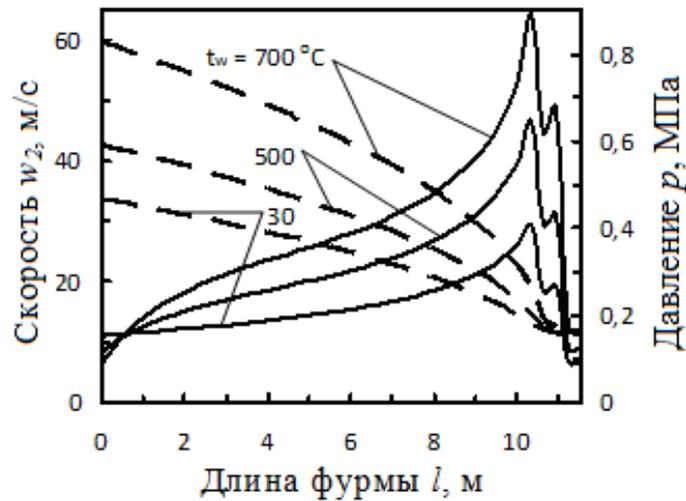


Рис. 3 – Влияние температуры  $t_w$  стенки трубы на распределение скорости  $w_2$  (—) газовзвеси и статического давления  $p$  (---) по длине  $l$  торкрет-фурмы

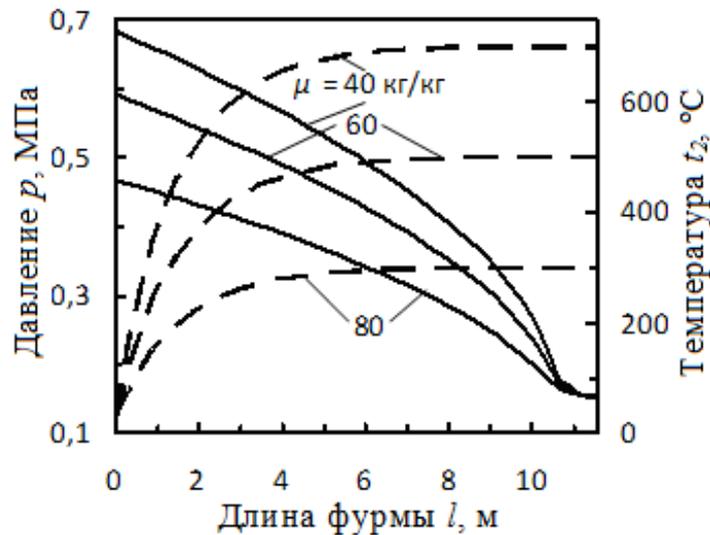


Рис. 4 – Распределение давления  $p$  (—) и температуры  $t_2$  порошка (---) по длине  $l$  фурмы при различной концентрации  $\mu$  порошка

Как следует из рисунка 4 для условий, чем больше  $\mu$ , тем ниже давление  $p$  на входе в фурму. Например, при увеличении  $\mu$  с 40 кг/кг до 80 кг/кг давление  $p$  уменьшается с 0,68 МПа до 0,47 МПа. Это объясняется тем, что при снижении  $\mu$  расход  $V_n$  несущего газа в несколько раз возрастает на что требуется затратить дополнительное давление.

Наиболее интересной является зависимость  $t_{12}(l)$ . Из рисунка 4 видно, что наиболее интенсивно газ нагревается на длине  $l \approx 4 - 5$  м, а на остальном участке температура изменяется незначительно.

Как видно из рис. 5, с повышением присоединенной массы шлака  $g_{ш}$ , температура струи  $t_x$  возрастает, а скорость струи  $w_x$  снижается. Например при повышении  $g_{ш}$  с 0 до 1, на расстоянии  $\bar{x} = 30$ , температура  $t_x$  возрастает с 9 до 1230°C, а скорость  $w_x$  уменьшается с 240 до 1 м/с.

Из рис. 6, следует, что расход азота через сопло  $V_n$  наиболее существенно влияет на термогазодинамические параметры потока. Так, если  $V_n$  увеличивается со 180 м<sup>3</sup>/мин до 380 м<sup>3</sup>/мин, то на расстоянии  $\bar{x} = 20$ , отношение температур  $T_x/T_l$  уменьшается с 3,69 до 1,85. Это объясняется тем, что чем выше  $V_n$ , тем меньше присоединенная масса газа из полости конвер-

тера. По этой причине с увеличением расхода через сопло струя как бы остывает и  $t_x$ ,  $t_x/t_1$  уменьшаются. А так как в одном и том же сечении с увеличением расхода  $V_n$  температура  $t_x$  снижается, то скорость  $w_x$  и отношение  $w_x/w_1$  увеличиваются.

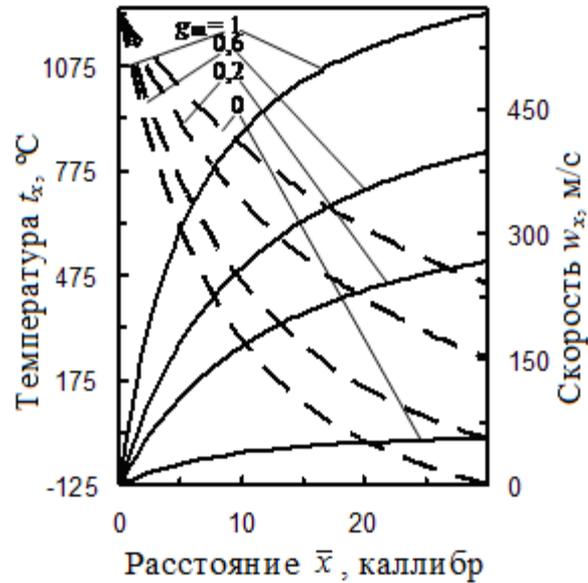


Рис. 5 – Влияние присоединенной массы шлака  $g_u$  на изменение температуры  $t_x$  (—) и скорости  $w_x$  (---) на расстоянии  $\bar{x}$  от среза сопла

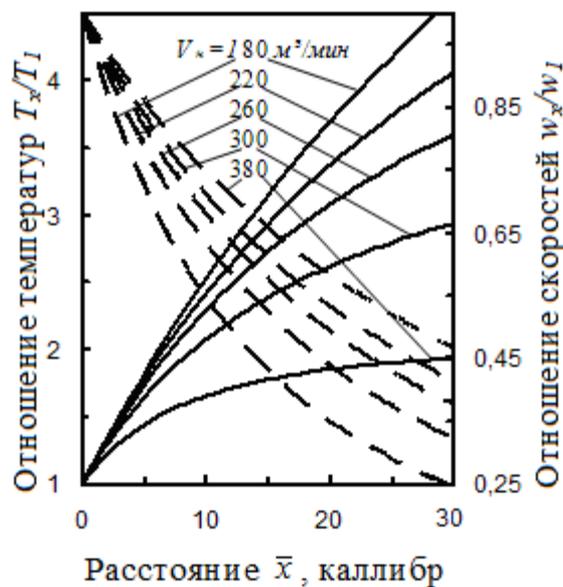


Рис. 6 – Изменение отношений температур  $T_x/T_1$  (—) и скоростей  $w_x/w_1$  (---) на удалении  $\bar{x}$  при различном расходе через сопло  $V_n$

### Выводы

1. Предварительный нагрев газовой смеси позволяет снизить расход кислорода, необходимого для образования высокотемпературного факела горения.
2. Экспериментально установлено, что если корпус фурмы для разбрызгивания шлака выполнить газоохлаждаемым и он становится теплообменником, то за счёт ранее теряемой теп-

лоты скорость потока газозвеси можно увеличить почти вдвое, а кинетическая энергия истекающих в полость кислородного конвертера струй возрастает в 3,5 раза.

3. Численные расчёты показали, что эжектирование шлака существенно изменяет картину взаимодействия трехкомпонентной сверхзвуковой нерасчётной струи с расплавом – даже незначительное присоединение шлака заметно тормозит струю.

4. Аналитическое решение подтверждается промышленным экспериментом – для подъёма брызг шлака на большую высоту необходимо приблизить фурму к расплаву.

#### Список использованных источников:

1. Новые технологии нанесения шлакового гаргисажа на футеровку конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, Е.Н. Сигарев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2014. – №6. – С. 7-12.
2. Фейлер С.В. Совершенствование технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом / С.В. Фейлер, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2014. – №4. – С. 43-49.
3. Rymarchyk N. Post Combustion Lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) Operations / N. Rymarchyk // Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 445-449.
4. Petrushka R. Improvement in Oxygen Lance Life / R. Petrushka, S. Manley // Steelmaking Conference Proceedings – 2000. – P. 245-250.
5. Ughadpada K. Production improvement of No. 2 BOSP at ESA / K. Ughadpada, S. Briglio, G. Mohammed // Iron and Steel Technology. – 2010. – №11 – P. 59-64.
6. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation / Stone R.P. [et al.] // AISTech Proceedings. – 2009. – №1. – P. 737-747.
7. Харлашин П.С. Моделирование тепловой работы футеровки 160т кислородного конвертера с учётом гаргисажа / П.С. Харлашин, Ассиил Кадхим Мохаммед // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2014. – Вип. 28. – С. 48-54.
8. Харлашин П.С. Исследование поперечных сил в газодисперсных потоках / П.С. Харлашин, Ассиил Кадхим Мохаммед, Р.Д. Куземко // Металл и литьё Украины. – 2013. – №11. – С. 3-8.
9. Харлашин П.С. Совершенствование теории течения газопорошковой смеси в торкрет-фурме кислородного конвертера / П.С. Харлашин, Ассиил Кадхим Мохаммед, Р.Д. Куземко, В.О. Синельников // XXVI международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии». Тезисы докладов – Днепропетровск: НМетАУ, 2014. – С. 186-187.

#### Bibliography:

1. New technologies for slag skull application on converter lining / E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feyler, E.N. Sigarev // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya. – 2014. – №6. – P. 7-12. (Rus.)
2. Feyler S.V. The improved technology of combined blowing of a converter bath with oxygen and indifferent gas / S.V. Feyler, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya. – 2014. – №4. – P. 43-49. (Rus.)
3. Rymarchyk N. Post Combustion Lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) Operations / N. Rymarchyk // Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 445-449.
4. Petrushka R. Improvement in Oxygen Lance Life / R. Petrushka, S. Manley // Steelmaking Conference Proceedings – 2000. – P. 245-250.
5. Ughadpada K. Production improvement of No. 2 BOSP at ESA / K. Ughadpada, S. Briglio, G. Mohammed // Iron and Steel Technology. – 2010. – №11 – P. 59-64.
6. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation / Stone R.P. [et al.] // AISTech Proceedings. – 2009. – №1. – P. 737-747.
7. Kharlashin P.S. Simulation of thermal lining works 160 t oxygen converter considering considering ledge / P.S. Kharlashin, Assiil Mohammed Kadhim // Reporter of the Priazovskyi state technical university: Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – 2014. – Issue 28. – P. 48-54. (Rus.)
8. Kharlashin P.S. Research transverse forces hazodyspersnyh flows / P.S. Kharlashin, Assiil Mohammed Kadhim, R.D. Kuzemko // Metal and casting of Ukraine. – 2013. – №11. – P. 3-8. (Rus.)

9. Kharlashin P.S. Improving the flow theory powder mixture in gunning lance oxygen converter / P.S. Kharlashin, Assil Mohammed Kadhim, R.D. Kuzemko, V.O. Sinelnikov // XXVI International conference «Heat engineering and energy in metallurgy»: Abstracts – Dnipropetrovsk: region: NMetAU, 2014. – P. 186-187. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 24.02.2015

УДК 669.184

© Харлашин П.С.<sup>1</sup>, Герасин С.А.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МЕЖФАЗНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ НА ХОЛОДНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕРТЕРА

*Теоретически разработаны и опробованы на холодной модели конвертера варианты различного погружения фурмы в жидкость, также определена скорость проникновения газовой струи в жидкость, исследовано поведение газовой струи в жидкой однородной среде. По результатам данного анализа было установлено, что за счет переменного положения фурмы обеспечивается более равномерное распределение кислорода в объеме жидкости, взаимодействие газовой струи и жидкости дает возможность расширить представление о развитии процессов массопереноса.*

**Ключевые слова:** межфазная поверхность, газовая струя, конвертер, продувка, массоперенос.

*Харлашин П.С., Герасин С.А. Дослідження взаємодії газового струменя і рідини через міжфазну поверхність на холодній моделі конвертера. Теоретично розроблені і випробувані на холодній моделі конвертера варіанти різного занурення фурми в рідину, також визначена швидкість проникнення газового струменя в рідину, досліджено поведінку газового струменя в рідкій однорідній середі. За результатами даного аналізу було встановлено, що за рахунок змінного положення фурми забезпечується більш рівномірний розподіл кисню в об'ємі рідини, взаємодія газового струменя і рідини дає можливість розширити уявлення про розвиток процесів масопереносу.*

**Ключові слова:** міжфазна поверхність, газовий струмінь, конвертер, продування, масоперенос.

**P.S. Kharlashin, S.O. Gerasin. Study of gas jet and liquid interaction through inter-phase surface on the converter simulating cold model.** Various kinds of tuyere sinking into liquid have been developed and tested on a converter simulating model, velocity of gas jet penetration into liquid has been defined, the gas jet behavior in liquid homogeneous medium has been researched. Experiments have been made on a simulating model of a 250-ton oxygen converter, made in the ratio 1:25 scale. Water is a metal- simulating liquid. Technically pure oxygen is blown. A one-nozzle tuyere has been used in the experiment, a gas jet going out of it interacting with motionless liquid. The blowing conditions having been specified, the behavior of the gas jet was observed, the crater shape

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [kharlashin\\_p\\_s@pstu.edu](mailto:kharlashin_p_s@pstu.edu)

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [ca-libr12@mail.ru](mailto:ca-libr12@mail.ru)