

10.3390/met13050926.

24. W. Li, Sh. Wang, J. Xu, J. Hu, H. Wang, Y. Zhai, Q. Xiao, G. Deng, and D. Li, «Numerical investigation of the enhanced stirring characteristics of a multi-lance top-blowing continuous converting furnace for lance arrangement and variable-velocity blowing», *Energies*, vol. 16, № 5, pp. 1-17, 2023. doi: **10.3390/en16052412**.
25. T.S. Golub, L.S. Molchanov, and S. Semykin. «Studying the possibility of using coherent type nozzles for bof blowing at the gas dynamic simulation stand», *Science and Innovation*, vol. 19, № 4, pp. 79-92, 2023. doi: **10.15407/scine19.04.079**.
26. R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass, and P.O. Hays, «Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace», *Transactions Metallurg. Soc. AIME*, vol. 239, № 11, pp. 1776-1791, 1967.
27. P.-Y. Dong, S.-G. Zheng, and M.-Y. Zhu, «Simulation and application of post-combustion oxygen lance in a top-blown converter», *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 50, № 1, pp. 55-66, 2023. doi: **10.1080/03019233.2022.2083928**.
28. P. Yushkevich, «Comparison of calculating methods of the main parameters for single-tier tuyeres», *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, vol. 99, № 3, pp. 112-123, 2020. doi: **10.33108/visnyk_tntu2020.03**.

Рецензент: В.Г. Кисляков

канд. техн. наук, зав. відділу, ІЧМ НАН України

Стаття надійшла 18.08.2023

Стаття прийнята 15.09.2023

УДК 669.184:519.22

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300058

© Asseel Mohammed Kadhim¹, Тарасюк Л.І.², Козловцев С.В.³,
Синельников В.О.⁴**ВПЛИВ НАГРІВУ ГАЗУ НА РОЗРАХУНКОВІ НАДЗВУКОВІ ПАРАМЕТРИ
СТРУМЕНЯ ГАЗОПОРОШКУ ПРИ ПРОДУВЦІ ШЛАКУ В КОНВЕРТЕРІ.
ПОВІДОМЛЕННЯ 1**

У статті показано, що одним із пріоритетніших завдань у технології виробництва сталі є підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. Показано, що шлакоудувка є радикальним способом підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. При продувці розплаву киснем вміст MgO в шлаку становить 6-8%. Для підвищення хімічної спорідненості шлаку та футеровки пропонується продувка конвертерного шлаку азотом або газопорошковими струменями. Для досягнення оптимальної хімічної спорідненості футеровки і шлаку останній рекомендовано модифікувати з метою збільшення в ньому оксиду магнію. Показано, що спроба підвищити ефективність моделювання дуже складних процесів взаємодії надзвучових струменів з конвертерним шлаком ще не вирішена. Зроблено критичний аналіз існуючих методів розробок математичної моделі, що базується на використанні відомих газодинамічних співвідношень взаємодії вільних турбулентних струменів з розплавом. Встановлено, що в шлаковий розплав завжди потрапляють лише надзвучові струмені з характерною для них ударно-хвильовою структурою. Наведено інтегральний метод розрахунку параметрів газопорошкового потоку в надзвучовому соплі з

¹ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, leonid.47.tarasiuk@gmail.com³ директор з виробництва, Маріупольський металургійний завод №1 ім. Ілліча, м. Запоріжжя⁴ Ph.D., senior specialist, Łukasiewicz Research Network - Institute of Ceramics and Building Materials, Polska, ORCID: 0000-0001-8794-7798

урахуванням концентрації порошку. Встановлено, як нагрівання газової суспензії впливає на необхідний тиск перед сопловим блоком, швидкість і щільність потоку у вихідному перерізі надзвукового сопла.

Ключові слова: конвертер, газодисперсна течія, концентрація порошку, показник політропії, критична швидкість.

Asseel Mohammed Kadhim, L.I. Tarasiuk, S.V. Kozlovtssev, V.O. Sinelnikov. The influence of gas heating on the calculated supersonic parameters of gas-powder flow at slag blower in the converter. Message 1. The article shows that one of the priority tasks in steel production technology is to increase the durability of the lining of oxygen converters. It is shown that the slag blower is a radical way to increase the durability of the lining of oxygen converters. When blowing the melt with oxygen, the MgO content in the slag is 6-8%. To increase the chemical affinity of the slag and the lining, it is proposed to blow the converter slag with jets of nitrogen or powder gas. To achieve optimal chemical affinity of the lining and slag, it is recommended to modify the latter by increasing the content of magnesium oxide in it to 12-14%. Increased durability of the lining makes it possible to solve the problem of replacing wasteful wastes of coal slag and changing environmental concerns on the excess media. It is shown that an attempt to increase the efficiency of modeling very complex processes of interaction of supersonic jets with converter slag has not yet been solved a. A critical analysis of existing methods for constructing mathematical models based on the use of known gas-dynamic laws of interaction of free turbulent jets with the melt is carried out. It has been established that only supersonic jets with their characteristic shock-wave structure always enter the slag melt. An integral method for calculating the parameters of a gas-powder flow in a supersonic nozzle taking into account the powder concentration is presented. It is determined how heating of the gas suspension affects the required pressure in front of the nozzle block, the speed and flow density in the outlet section of the supersonic nozzle. The gas dynamics system is connected to the heat exchange of the flowing gas-dispersed mixture in the Laval expansion nozzles to establish the heating effect in front of the nozzle block of the two-phase gas suspension to a temperature that will ensure The increase in the fluidity of the gas flow is doubled and its kinetic energy is increased threefold. The method of expanding the parameters of the gas-powder flow between the Laval expansion nozzle involves the infusion of 10 physical effects into 14 parameters of the gas-powder flow. It is shown that numerical expansions allow the tuyere body to be used as a heat exchanger for heating the gas suspension, as well as for increasing the pressure of the gas-powder jet that flows from the nozzles.

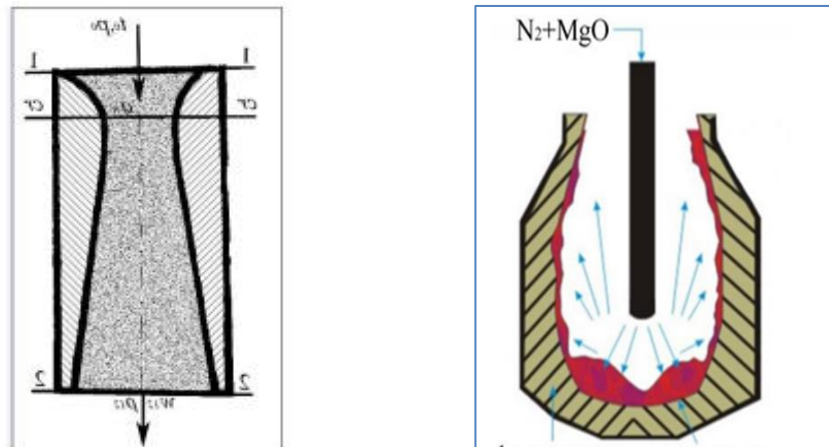
Key words: converter, gas-dispersed flow, powder concentration, polytropy indicator, critical speed.

Постановка проблеми. В даний час одним з важливих напрямів у сферах енерго- та ресурсозбереження киснево-конвертерних цехів є продовження терміну служби вогнетривкої футеровки конвертерів. Ця проблема вирішується двома способами: 1 – використанням високоякісних і дорогих вогнетривів; 2 – торкретуванням футеровки конвертерів з використанням модифікованого конвертерного шлаку.

У великотоннажних конвертерах товщина футеровки може досягати ≈ 900 мм, а її знос за одну плавку досягає 1 мм. Для перефутерування витрачається до 900 т дорогих периклазовуглецевих вогнетривів. Вартість такої операції становить ≈ 1 млн. \$, що значно збільшує собівартість сталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найпріоритетніших завдань у технології виробництва сталі, що кардинально впливає на її собівартість, є підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів, яка на окремих металургійних підприємствах досягає лише 7 тис. плавок і менше. Вартість переробки 350 т кисневого конвертера становить $\sim 0,85$ млн \$ [1-3]. На великих металургійних заводах світу вже отримані інноваційні розробки та дивовижні результати – за рахунок видування шлаку (рис. 1) опір збільшено в кілька разів, а на окремих металургійних заводах ряду країн він збільшений до 40-55 тис. плавок [1]. Вміст MgO в шлаку після

продувки розплаву киснем становить 6-8 %. Для підвищення хімічної спорідненості шлаку та футеровки в роботах [4, 5] було запропоновано продувати шлак в конвертері не азотом, а газопорошковими струменями (рис. 1).



а – вихідна секція сопла

б – роздувка шлаку на футеровку

Рис. 1 – Схеми подачі газопорошкової суміші через розширювальне сопло Лаваля (а) і продування залишкового шлаку в порожнину кисневого конвертера (б) [8]

Ряд досліджень вчених різних країн показали, що для досягнення оптимальної хімічної спорідненості футеровки і шлаку конвертерний шлак необхідно модифікувати таким чином, щоб збільшити вміст оксиду магнію до 12-14 % [3, 6, 7].

Підвищення довговічності футеровки конвертерів може вирішити іншу, не менш важливу проблему – за рахунок зменшення шкідливих викидів і, перш за все, загального шлаку, зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище. Але як підвищити ефективність масштабної програми моделювання дуже складних процесів взаємодії надзвукових струменів із конвертерним шлаковим розплавом, розробити рекомендації щодо скорочення часу розробки проривних технологій і тим самим прискорити їх впровадження – ці завдання все ще не вирішено.

Недосконалість опублікованих раніше методів розрахунку полягає в тому, що майже у всіх випадках при визначенні проникнення струменів у розплав використовувалися відомі газодинамічні співвідношення взаємодії вільних турбулентних струменів з розплавом, але насправді це ніколи не відбувається в порожнині перетворювача. Як показано в роботах [4], у шлаковий розплав завжди потрапляють лише надзвукові струмені з характерною для них ударно-хвильовою структурою [5].

Мета дослідження – розв’язати систему рівнянь газодинаміки та теплообміну течії газодисперсної суміші в розширювальних соплах Лаваля для встановлення ефекту нагріву перед сопловим блоком двофазної газосуспензії до температури t_0 при змінній масовій концентрації μ від критичної швидкості a_{cr} , а також швидкості w_{12} , густини ρ_{12} газопорошкового потоку у вихідній секції сопла.

Виклад основного матеріалу.

Фізико-математична модель. У даній роботі для вирішення дуже складної задачі, в якій можна вивчити вплив ~ 10 фізичних ефектів на ~ 14 параметрів газодисперсного потоку, які важко розрахувати, використовується наступний підхід. У повідомленні 1 для одновимірної моделі (псевдогазу) описано методику розрахунку параметрів газопорошкового потоку в межах лише розширювального сопла Лаваля, а також методику та результати розрахунку газодинамічних параметрів надзвукових непроектних газопорошкових трифазних струменів в порожнині конвертера, які представлені в повідомленні 2.

Математична модель (2 повідомлення) включає ~ 50 рівнянь, які розв’язуються разом. У розрахунках використовувалися співвідношення, відомі з класичної газової динаміки [4-6], але

записані для складної газодисперсної течії. Ось деякі з них. У формі використано залежність між абсолютним тиском перед соплом p_o і температурою гальмування t_o :

$$p_o = \frac{m_1(1+\mu)\sqrt{R_1 T_o / (1+\mu\psi)}}{F_{кр}} \left(\sqrt{N \left(\frac{2}{N+1} \right)^{\frac{N+1}{N-1}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де розраховувався індекс політропності пилогазового потоку

$$N = (k - 1) \cdot (1 - \varphi_1) + 1. \quad (2)$$

У рівнянні (2) поправочні коефіцієнти визначали за формулами

$$\varphi_1 = \frac{v - (1+b) \cdot \rho_o}{v - \frac{k-1}{k} (1+b) \cdot \rho_o}; \quad b = \frac{1-\psi}{1+\mu\psi^2} \cdot \frac{\mu}{\mu\psi^2}; \quad v = \left(1 + \mu \frac{c_2}{c_{p1}} \right) \frac{1+\mu\psi}{1+\mu\psi^2}. \quad (3)$$

Оскільки розміри сопла Лаваля $D_{кр}$ і D_1 задані, то, знаючи площі поперечного перерізу $F_{кр}$ і F_1 , легко визначити газодинамічну функцію масової витрати газової суспензії $q(\lambda_{12}) = F_{кр} / F_1$. Тоді з рівняння

$$q(\lambda_{12}) = \left(\frac{N+1}{2} \right)^{\frac{1}{N-1}} \lambda_{12} \left(1 - \frac{N-1}{N+1} (\lambda_{12}^2)^{\frac{1}{N-1}} \right). \quad (4)$$

на вихідній ділянці сопла знаходили відносну швидкість і число Маха сопла

$$M_{12} = \sqrt{\frac{2}{N+1} \lambda_{12}^2 / \left(1 - \frac{N-1}{N+1} (\lambda_{12}^2) \right)}. \quad (5)$$

Газодинамічну функцію тиску розраховували за формулою

$$\pi(\lambda_{12}) = \frac{P_r}{P_o} = \left(1 - \frac{N-1}{N+1} \lambda_{12}^2 \right)^{\frac{N}{N-1}}. \quad (6)$$

Тоді розрахунковий гальмівний тиск газопідвіски і щільність перед форсункою будуть дорівнювати:

$$\rho_{o12} = \frac{p_o(1+\mu\psi)}{R_1 T_o} : P_o = \frac{p_r}{\pi \cdot \lambda_{12}}. \quad (7)$$

Критична швидкість двофазного потоку в мінімальному перерізі сопла Лаваля розраховувалась як

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2N}{N+1} \cdot \frac{R_1 T_o}{1+\mu\psi}}. \quad (8)$$

Швидкість витікання газопорошкового струменя з розширювального сопла визначали за формулою

$$w_{12} = \sqrt{\frac{2N}{N-1} \cdot \frac{R_1 T_o}{1+\mu\psi} \left[1 - \left(\frac{p_r}{p_o} \right)^{\frac{N-1}{N}} \right]}. \quad (9)$$

Густину газопорошкової суспензії ρ_{12} у вихідному перерізі сопла Лаваля визначали як

$$\rho_{12} = \rho_o \varepsilon(\lambda_1) = \frac{p_o(1+\mu\psi)}{R_1 T_o} \left(1 - \frac{N-1}{N+1} \lambda_{12}^2 \right)^{1/N-1}. \quad (10)$$

У формулах (1)-(10) і наступних використовуються такі позначення: R_1 – газова стала азоту, кДж/(кг·К); $m_1 = \rho_n V_n$ – масова витрата газу-носія (азоту), кг/с; ρ_n, V_n – щільність азоту (кг/м³) і об'ємна витрата азоту (м³/хв) за нормальних фізичних умов; m_{12} – масова витрата газопорошкової суміші через сопло, кг/с; w_{12} – швидкість газосуспензії на виході з сопла, м/с; $\mu = m_2/m_1$ – масова концентрація порошку в газодисперсному потоці, кг/кг; $\psi = w_2/w_1$ – коефіцієнт ковзання фази для порошку. Індеси позначають параметри: 1 – газ-носії, 2 – частинки порошку, 12 – газова суспензія, G – в порожнині конвертера.

Вихідні дані. Потік газоподібного порошку азоту витікає з розширювального сопла Лаваля фурми кисневого конвертера. Температуру гальмування газосуспензії t_o (перед блоком сопелів) змінювали в діапазоні 25°C-600°C, а концентрацію порошку в діапазоні $\mu = 0,2-2$ кг/кг. Витрату азоту через одне сопло прийняли рівним $V_n = 100$ м³/хв за умови, що діаметр сопла в критичному перерізі $D_{кр} = 32$ мм, а на вихідному перерізі $D_1 = 49$ мм; витрата порошку $m_2 = 37,5$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг). Щільність азоту за нормальних умов становить $\rho_n = 1,25$ кг/м³. Попередньо встановлювали тиск перед соплом $p_o = 1,25$ МПа, а потім його перевіряли.

Результати розрахунків та їх аналіз. Одним із важливих питань даного дослідження є вплив підвищення температури газосуспензії на тиск застою p_o двофазної течії при постійних

діаметрах критичної $D_{кр}$ та вихідної ділянок D_1 розширювального сопла ($D_{кр} = const, D_1 = const$) і витратою $V_n = const$, але зі зміною витрати m_2 твердої фази, тобто змінним значенням μ .

Як впливає з рис. 2, зі збільшенням температури t_0 тиску опору r_0 зростає при будь-якій концентрації μ порошку в газовій суспензії. Так, якщо $\mu = 1,4$ кг/кг, то підвищення температури газової суспензії від 100°C до 400°C і постійний потік фаз ($m_2 = const, V_n = const$) призводить до збільшення тиску p_0 від 1,43 МПа до 1,88 МПа. Це пояснюється тим, що, як впливає з рівняння (1), зі збільшенням t_0 і, відповідно, зменшенням густини ρ_0 при $F_{кр} = const$ і $V_n = const$ тиск p_0 також зростає. Видно, що при одній і тій же температурі, наприклад, $t_0 = 200^\circ\text{C}$, збільшення μ з 0,2 кг/кг до 2 кг/кг викликає необхідність підвищення тиску p_0 з 1,1 МПа до 1,78 МПа.

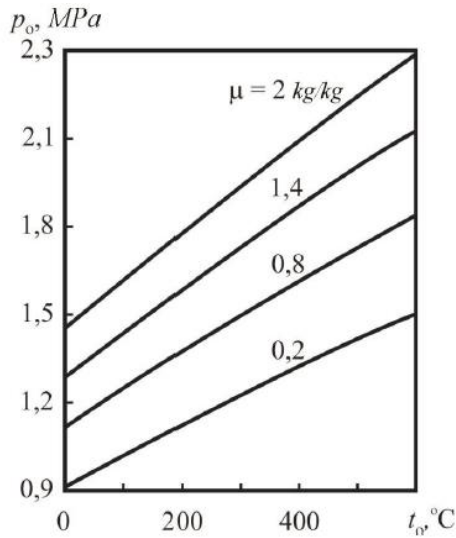


Рис. 2 – Залежність тиску p_0 перед соплом Лавалю від концентрації μ порошку при різних температурах гальмування t_0 . Вихідні дані $V_n = 100$ м³/хв; $D_{кр} = 32$ мм; $D_1 = 49$ мм; $m_2 = 25-250$ кг/хв, $\rho_2 = 1700$ кг/м³; $\psi = 0,8$

Температура t_0 газової суспензії має значний вплив на критичну швидкість a_{cr} під час течії всередині надзвукового сопла Лавалю (рис. 3).

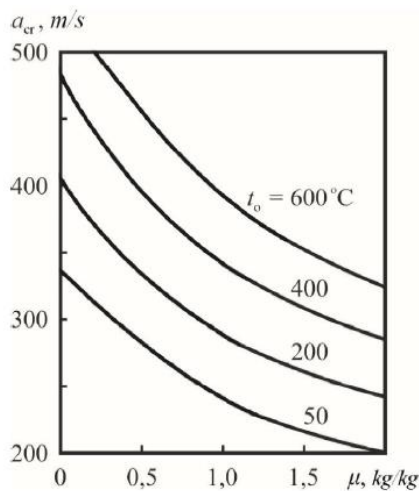


Рис. 3 – Вплив температури застою t_0 газосуспензії на зміну критичної швидкості a_{cr} в мінімальному перерізі сопла Лавалю при різних концентраціях μ порошку. Вихідні дані: $p_0 = 1,25$ МПа, $V_n = 100$ м³/хв, $\rho_n = 1,25$ кг/м³, $D_{кр} = 32$ мм, $D_1 = 49$ мм, $m_2 = 0-250$ кг/хв, $\rho_2 = 1700$ кг/м³

Наприклад, якщо концентрація порошку $\mu = 1 \text{ кг/м}^3$, то з підвищенням температури t_0 від 50°C до 600°C критична швидкість a_{cr} зростає з 240 м/с до 390 м/с . Також видно, що в заданих умовах зі збільшенням концентрації μ порошку в газовій суспензії критична швидкість a_{cr} зменшується. Наприклад, при температурі гальмування до 400°C і збільшенні μ від $0,25 \text{ кг/кг}$ до 2 кг/кг швидкість a_{cr} зменшується з 425 м/с до 285 м/с . Якщо $\mu = 0,5 \text{ кг/кг} = \text{const}$, то, наприклад, при підвищенні температури газової суспензії від 50°C до 600°C критична швидкість a_{cr} зростає в $\sim 1,6$ рази, від 286 м/с до 460 м/с .

Найбільш переконливо ефективність нагрівання газової суспензії перед сопловим блоком можна показати, аналізуючи результати впливу t_0 на швидкість w_{12} і густину ρ_{12} у вихідному перерізі сопла (рис. 4). Результати чисельних розрахунків показують, що при збільшенні температури t_0 , наприклад, від 50°C до 350°C і коефіцієнта $\psi = 0,8$, швидкість w_{12} витікання газосуспензії з сопла зростає від 570 м/с до 740 м/с (в $1,3$ рази). За тих же умов (t_0 зростає від 50°C до 350°C) густина газової суспензії ρ_{12} у вихідній секції сопла зменшується з $2,75 \text{ кг/м}^3$ до $2,1 \text{ кг/м}^3$.

Якщо при $t_0 = 350^\circ\text{C}$ коефіцієнт ψ зменшується від 1 до $0,6$, то швидкість w_{12} витікання газосуспензії з сопла зростає з 725 м/с до 765 м/с , оскільки дисипація енергії на прискорення частинок зменшується. За тих же умов ($t_0 = 350^\circ\text{C}$, ψ зменшується від 1 до $0,6$) щільність ρ_{12} газової суспензії зростає з $1,95 \text{ кг/м}^3$ до $2,24 \text{ кг/м}^3$.

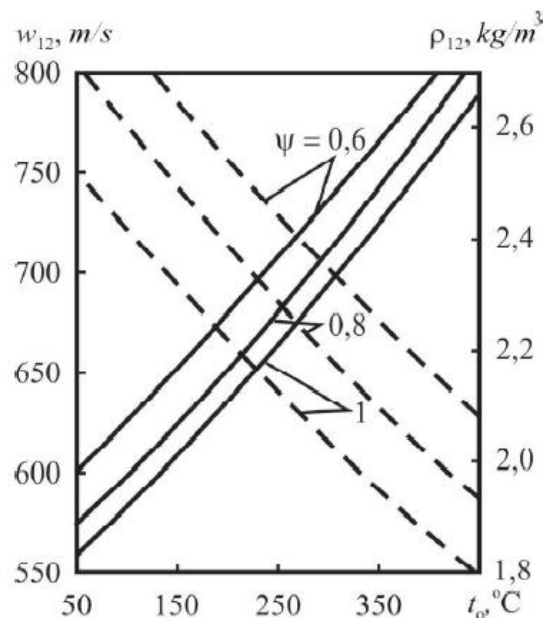


Рис. 4 – Залежність швидкості w_{12} (—) газопорошкового струменя у вихідній секції сопла Лавалю та густини ρ_{12} (- -) у цій же секції від температури застою t_0 газосуспензії перед сопловим блоком і коефіцієнт ковзання фази ψ . Вихідні дані: $p_0 = 1,25 \text{ МПа}$, $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$, $D_{кр} = 32 \text{ мм}$, $D_1 = 49 \text{ мм}$, $\mu = 0,3 \text{ кг/кг}$, $\rho_2 = 1700 \text{ кг/м}^3$

Адекватність моделі – оскільки в порожнині перетворювача практично неможливо провести експерименти, які підтвердили б результати чисельних розрахунків, підтвердимо адекватність моделі отриманим методом окремого випадку. Отже, якщо:

– концентрація порошку $\mu = 0$, тоді в рівняннях (2) і (3) $b = 0$ і $v = 1$, $\psi_1 = 0$, $N = k$, де показник адіабати для потоку чистого газу (без часток)

$$k = c_p / c_v;$$

$t_0 = 400^\circ\text{C}$ швидкість $a_{cr} = 483 \text{ м/с}$ тощо, що підтверджує точність розрахунків (рис. 3);

– μ збільшується, струмінь стає важчим, а його наростаюча швидкість зменшується при будь-яких значеннях t_0 , що очевидно (рис. 3);

– коефіцієнт ковзання фази $= 1$, то відставання частинок відсутнє ($w_1 = w_2$), що призводить до дисипації енергії та зменшення швидкості газозавису w_{12} при будь-якому значенні t_0 , що підтверджено експериментально (рис. 4);

– зростає температура t_0 , потім зростає швидкість w_{12} , а при прискоренні потоку густина ρ_{12} завжди лише зменшується, що не викликає сумніву (рис. 4).

Представлена модель розрахунку надзвукового сопла дає можливість визначити параметри газопорошкового надзвукового струменя з урахуванням його ударно-хвильової структури, додавання газу та шлаку з порожнини конвертора. Це, що дуже важливо, дозволяє розрахувати як енергетичні характеристики пилогазового потоку – швидкість w_x , імпульс I_x , потужність N_x , в момент введення в нього шлаку, так і шляхи збільшення силового впливу на розплав, тому що в конвертері її потрібно підняти до $\sim 6-8$ м.

Врахування ряду факторів і фізичних впливів на параметри полідисперсного потоку, наприклад, таких як ковзання фази, форма частинок, що взаємодіють між собою і зі стінками каналів, дроблення, поява фрагментів, які фактично утворюють третю фазу, щільність частинок різних фракцій та інші, ускладнюють вирішення основної проблеми – визначення w_x , I_x , N_x , а також діаметра отвору D_x і глибини струменя h_x . Це є предметом окремого дослідження існуючої науково-технічної проблеми і в даній роботі не розглядається.

Висновки та рекомендації:

1. Ефективне використання енергії стиснених газів, радикальне скорочення викидів шлаків у навколишнє середовище є національною проблемою для найбільших металургійних центрів.

2. Вплив концентрації μ вогнетривкого порошку, нагрівання газосуспензії перед сопловим блоком фурми кисневого конвертера на температуру t_0 , коефіцієнта ковзання частинок порошку ψ на тиск p_0 в перед соплом, критична швидкість a_{cr} , швидкість газорозрядного витікання w_{12} , яка в подальшому враховується з урахуванням цих важливих факторів, дозволить розрахувати параметри надзвукового газопорошкового струменя в порожнині перетворювача.

3. Чисельні розрахунки показали, що використання корпусу фурми як теплообмінника, шляхом нагріву газової суспензії від 50°C до 400°C , дозволяє збільшити потужність газопорошкового струменя, що витікає з сопла, майже в 2 рази.

Перелік використаних джерел:

1. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Influence of the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining. *Glass and Ceramics*. 2016. Vol. 73. No. 3-4. Pp. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5>.
2. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during to improve lining resistance. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 4. Pp. 403-409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>.
3. Kalisz D., Sinelnikov V.O., Kuglin K. Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 55. No. 5. Pp. 463-468. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0128-1>.
4. Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter / Sinelnikov V.O., Kalisz D., Żak P.L., Kuzemko R.D. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 461. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012078>.
5. Kharlashin P.S., Kuzemko R.D., Sinelnikov V.O. Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. *New developments in mining engineering: Taylor & Francis Group, A Balkema Book*. London. 2015. Pp. 597-602.
6. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Influence of hydrodynamic and temperature conditions on the efficiency of the slag splashing method. *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*. 2017. Vol. 105. № 2. Pp. 93-98.
7. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы / Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Устинов В.А., Геращук Ю.Д. *Металл и литье Украины*. 2009. № 1-2. С. 9-15.
8. A Review of Slag Splashing / K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, H.T. Tsai. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. Iss. 5. Pp. 619-633. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619>.

References:

1. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining», *Glass and Ceramics*, vol. 73, no. 3-4, pp. 144-148, 2016. doi: [10.1007/s10717-016-9844-5](https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5).
2. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, and R.D. Kuzemko, «Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during to improve lining resistance», *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 59, no. 4, pp. 403-409, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>.
3. D. Kalisz, V.O. Sinelnikov, and K. Kuglin, «Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter», *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 55, no. 5, pp. 463-468, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0128-1>.
4. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, P.L. Žak, and R.D. Kuzemko, «Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 461, pp. 1-6, 2018. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012078>.
5. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, and V.O. Sinelnikov, *Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. New developments in mining engineering*. London, UK: Taylor & Francis Group, A Balkema Book Publ., 2015.
6. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, and R.D. Kuzemko, «Influence of hydrodynamic and temperature conditions on the efficiency of the slag splashing method», *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*, vol. 105, № 2, pp. 93-98, 2017.
7. L.M. Akselrod, A.P. Laptev, V.A. Ustynov, and Yu.D. Herashchuk, «Povishenye stoikosty futerovky konverterov: ohneupori, tekhnolohycheskye pryemi» [«Increasing the durability of converter linings: refractories, technological methods»], *Metall y lyte Ukraini – Metal and Casting of Ukraine*, № 1-2, pp. 9-15, 2009. (Rus.)
8. K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, and H.T. Tsai, «A Review of Slag Splashing», *ISIJ International*, vol. 45, iss. 5, pp. 619-633, 2005. doi: [10.2355/isijinternational.45.619](https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619).

Рецензент: В.О. Маслов,
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 08.09.2023
Стаття прийнята 13.10.2023

УДК 669.184:519.22

doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.300059](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300059)

© Asseel Mohammed Kadhim¹, Тарасюк Л.І.², Козловцев С.В.³,
Синельников В.О.⁴

ВПЛИВ НАГРІВУ ГАЗУ НА РОЗРАХУНКОВІ НАДЗВУКОВІ ПАРАМЕТРИ СТРУМЕНЯ ГАЗОПОРОШКУ ПРИ ПРОДУВЦІ ШЛАКУ В КОНВЕРТЕРІ. ПОВІДОМЛЕННЯ 2

В статті наведено результати чисельного моделювання взаємодії надзвукового нерозрахункового газопорошкового струменя з навколишнім сильно нагрітим середовищем порожнини конвертера, у тому числі з частинками шлаку, які викидаються струменем. Методика визначення глибини проникнення струменя у розплав є предметом багаторічних дискусій, але вона аналітично не вирішена. Запропоновано новий підхід до вирішення цієї проблеми, який полягає в тому, що в даній роботі

¹ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, leonid.47.tarasiuk@gmail.com

³ директор з виробництва, Маріупольський металургійний завод №1 ім. Ілліча, м. Запоріжжя

⁴ Ph.D., senior specialist, Lukasiewicz Research Network – Institute of Ceramics and Building Materials, Polska, ORCID: [0000-0001-8794-7798](https://orcid.org/0000-0001-8794-7798)