

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)

структура розглядається не за законами дозвукової турбулентної течії, а як надзвукова нерозрахункова. В даній роботі стоїть завдання – для підвищення стійкості шлакової корки в азот передбачено подачу порошку MgO , який в свою чергу потрапляє у струмінь, сповільнює його. Для вирішення цього питання запропоновано розв'язання багатопараметричних рівнянь для встановлення впливу нагріву на якісні характеристики шлакової корки на поверхні футеровки. Створена фізична модель, яка передбачає витікання газопорошкового струменя (N_2 + порошок) із сопла Лавалля. Встановлено формування за межами сопла струменю, що стає надзвуковим нерозрахунковим з ударною хвилею структурою. Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс, який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів. Схема вирішення досить високотехнологічної задачі передбачає наступне: розрахунок параметрів газопорошкового потоку на виході із сопла; розрахунок кількості приєднаної газової маси з навколишнього середовища; температури; швидкості імпульсу; -потужності струменю і т.і. Встановлено, що в окремих випадках, коли забезпечується хімічний зв'язок між шлаком і футеровкою (коли має місце оптимальне значення MgO і CaO в шлаку), подачу вогнетривкового порошку можливо припинити і тоді шлак буде роздуватися тільки струменем азоту. Використовуючи закон сталості імпульсу в різних перерізах струменя (наприклад, у вихідному перерізі сопла і в фіксованому перерізі потоку xx), можливо розрахувати: повний імпульс, середньомасову швидкість азотно-порошкового струменя, середньомасову температуру струменя. Показано, що найбільш суттєво на потужність газопорошкового струменя, що витікає в розплав, впливає нагрівання газодисперсного потоку до температури t_0 перед фурменними соплами. Встановлено, що підвищення температури від $50^\circ C$ до $600^\circ C$ призводить до збільшення імпульсу майже у 2,75 рази. Спільне рішення майже 50 рівнянь (повідомлення 1 і 2) дозволяє наочно представити картину взаємодії надзвукового струменя з ударними хвилями і розплавом, а також розробити рекомендації щодо підвищення енергоефективності шлакодувної технології. Оскільки проведення експерименту в порожнині конвертера складно, результати чисельних розрахунків перевірені методом особливих випадків.

Ключові слова: конвертор, надзвуковий струмінь, розсіяний потік, реактивний імпульс, реактивна потужність.

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 2. The article presents the results of numerical modeling of the interaction of a supersonic non-calculated gas-powder jet with the surrounding strongly heated environment of the converter cavity, including slag particles ejected by the jet. The method of determining the depth of penetration of the jet into the melt is the subject of many years of discussion, but it has not been solved analytically. A new approach to solving this problem is proposed, which consists in the fact that in this work the structure is considered not according to the laws of subsonic turbulent flow, but as supersonic, not calculated. In this paper, there is a task - to increase the stability of the slag crust, nitrogen supply of MgO powder is provided, which, in turn, enters the jet and slows it down. To solve this problem, the solution of many parametric equations is proposed to establish the effect of heating on the qualitative characteristics of the slag crust on the surface linings. A physical model has been created that predicts the outflow of a gas-powder jet (N_2 + powder) from a Laval nozzle. The formation outside the jet nozzle is established, which becomes a supersonic non-computational structure with a shock wave. The most important hydro-gas-dynamic characteristic of the gas jet flow is its momentum, which depends on a number of factors and physical effects. The scheme for solving a fairly high-tech problem involves the following: calculation of the parameters of the gas-powder flow at the exit from the nozzle; calculation of the amount of added gas mass from the environment; temperature: pulse speed; jet power, etc. It was established that in some cases, when a

chemical connection between the slag and the lining is ensured (when there is an optimal value of MgO and CaO in the slag), it is possible to stop the supply of refractory powder and then the slag will be inflated only with a nitrogen jet. Using the law of constancy of momentum in different cross-sections of the jet (for example, in the outlet cross-section of the nozzle and in the fixed cross-section of the XX stream), it is possible to calculate: total momentum, average mass velocity of the nitrogen-powder jet, average mass temperature of the jet. It is shown that the power of the gas-powder jet flowing into the melt is most significantly affected by the heating of the gas-dispersed flow to the temperature before the nozzles. It was established that an increase in temperature from 50°C to 600°C leads to an increase in momentum by almost 2.75 times. The joint solution of almost 50 equations (messages 1 and 2) makes it possible to visually present the picture of the interaction of the supersonic jet with shock waves and melt, as well as to develop recommendations for improving the energy efficiency of slag-blowing technology. Since conducting an experiment in the converter cavity is difficult, the results of numerical calculations are verified by the method of special cases.

Key words: converter, supersonic jet, scattered flow, reactive impulse, reactive power.

Постановка проблеми. Методика визначення глибини проникнення струменя в розплав є предметом багаторічних дискусій. Протягом багатьох років видатні вчені-металурги розробляли теорію взаємодії газових струменів з рідкою ванною. Вважалося, що струмінь проникає в рідину до тих пір, поки не буде досягнута рівновага між її динамічним тиском на дні отвору і статичним тиском стовпа розплаву, рівним глибині проникнення цього струменя в рідинну ванну. Однак до кінця це питання аналітично не вирішено. Потрібні нові методи розрахунку реальних струменів у порожнині конвертора. Новий підхід полягає в тому, що в даній роботі структура розглядалася не за законами дозвукової турбулентної течії, а вважалося, що всі реальні струмені, що витікають із сопел фурми в порожнину конвертора під високим тиском (1,2-1,8 МПа), завжди надзвукові нерозраховані. Ударно-хвильова структура струменя включає систему прямої та косої ударних хвиль, де відбувається значне падіння загального тиску та збільшення ентропії (рис. 1).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даній дослідницькій роботі стоїть складне завдання – для підвищення міцності захисної шлакової кірки в азот перед фурмою необхідно додавати порошок MgO [1-6], а падаючі частинки шлаку знову потрапляють у струмінь і сповільняють їх. Тому газопорошковий надзвуковий нерозрахований струмінь також стає трифазним, що приєднує як газ порожнини конвертора зі значно змінюваною температурою, так і частинки шлаку [4, 7-10].

Необґрунтоване перенесення результатів досліджень взаємодії дозвукового турбулентного струменя з розплавом замість реально існуючого надзвукового струменя призводить до заниження імпульсу струменя у кілька разів [7-8].

Мета дослідження. Розв'язування системи багатопараметричних рівнянь для встановлення впливу нагріву до температури газової суспензії перед сопловим блоком фурм на середньомасові значення швидкості w_x , імпульсу I_x , потужності N_x надзвукового нерозрахованого струменя в порожнині кисневого конвертера для різних значень концентрації μ вогнетривкого порошку та коефіцієнтів ψ і ψ_s .

Виклад основного матеріалу.

Фізична модель. Газопорошковий струмінь (N_2 + порошок) витікає з сопла Лавалля фурми кисневого конвертера і проникає в шлаковий розплав. Як показали експериментальні дослідження, внаслідок постійного зниження тиску p_0 перед соплами (до 10 хв) струмінь, що витікає з надзвукового розширювального сопла постійного перерізу, обов'язково стає надзвуковою нерозрахованою з характерною для неї ударною хвилею структурою (рис. 1).

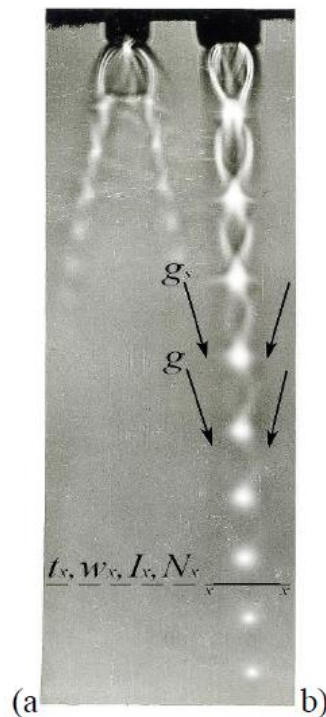


Рис. 1 – Тіньова картина витікання двох надзвукових струменів з хвильовою структурою та різним ступенем відхилення від n при однаковому тиску p_0 перед соплами, однаковій витраті повітря V_n , але з різною формою насадки: а) $n = 5,6$; б) $n = 1,7$

Крім того, чим більше перепад тиску на виході з сопла і в навколишньому середовищі, тим більші втрати хвилі в струмені за соплом. Так, при дисбалансі [7] в цьому режимі ударні хвилі є невід'ємною частиною надзвукового струменя [9-10]. У прямих і косих ударних хвилях цього нерозрахованого струменя виникають переломи траєкторії елементарних струменів, через що збільшується дисипація енергії струменя [7], внаслідок чого додавання газу з порожнини конвертора і імпульс струменя I_x суттєво залежать від ступеня нерозрахованого n , що враховано в розрахунковій моделі у цій статті.

Незважаючи на те, що недорозширений струмінь за вихідною ділянкою сопла продовжує прискорюватися, розширення за соплом завжди менш досконале, ніж всередині сопла, і неминуче супроводжується утворенням слабких і сильних ударних хвиль у вигляді звукових поверхней обертання з криволінійною твірною і бочкоподібною формою ядра струменя.

В окремих випадках, коли забезпечується хімічний зв'язок між шлаком і футеровкою [3-4] (вибрано оптимальне значення MgO і CaO в шлаку), подачу вогнетривкого порошку можна припинити і тоді шлак буде надуватися тільки струменем азоту. Ця модель дозволяє розрахувати взаємодію чистого (без порошку) надзвукового непроектного струменя з шлаковим розплавом, але з урахуванням додавання шлакових крапель.

Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс I_x , який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів.

Математична модель. Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс I_x , який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів. Використовуючи закон сталості імпульсу в різних перерізах струменя (наприклад, у вихідному перерізі сопла і в перерізі потоку x , $I_{12} = I_x = \text{const}$), запишемо вираз для повного імпульсу струменя, що витікає з сопла у формі

$$I_{12} = m_{12} + w_{12} + F_1(p_1 - p_2). \quad (1)$$

Тоді повний імпульс струменя в поперечному перерізі можна легко представити у вигляді

$$I_x = \rho_x \cdot V_x \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) \cdot (1 + g + g_5) \cdot w_x. \quad (2)$$

Середньомасова швидкість азотно-порошкового струменя з урахуванням викиду азоту з порожнини конвертера та прикріпленого струменем шлаку розрахована на відстані від сопла [4]:

$$w_x = \left[w_{12} \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) + \frac{P_g \cdot (n-1)}{\rho_{12} \cdot w_{12}} - \frac{F_x}{F_1} \cdot \frac{p_x - p_g}{\rho_{12} \cdot w_{12}} \right] \cdot \frac{1}{(1+\mu) \cdot (1+g+g_s) \cdot \beta^2} \quad (3)$$

де $g = m_g / m_{12} = m_g / (m_1 + m_2)$ – відносна приєднана маса газу до струменя;
 $g_s = m_s / m_{12} = m_s / (m_1 + m_2)$ – відносна маса шлаку.

Якщо тиск у потоці $p_x \rightarrow p_1$, що найчастіше буває, то рівняння (2) набуває більш простого вигляду [4]:

$$w_x = \left[w_{12} \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) + \frac{P_g \cdot (n-1)}{\rho_{12} \cdot w_{12}} \right] \cdot \frac{1}{(1+\mu) \cdot (1+g+g_s) \cdot \beta^2} \quad (4)$$

З рівняння теплового балансу для перетину струменя від виходу сопла до перетину $x-x$ (нехтуючи випромінюванням) легко показати, що середньомасову температуру струменя можна розрахувати за формулою:

$$T_x = \frac{(C_{p12} \cdot T_{12} + \alpha_{12} \cdot \frac{w_{12}}{2} + g \cdot C_{px} \cdot T_g + g_s \cdot C_s \cdot T_s)}{(1+g+g_s) \cdot C_{pc}} - \alpha_x \cdot w_x^2 / 2. \quad (5)$$

Схема вирішення дуже високотехнологічної задачі була наступною: розраховувалися параметри газопорошкового потоку на виході з сопла (повідомлення 1), обчислювалася кількість приєднаної газової маси g з навколишнього середовища, а потім температура t_x , швидкість w_x , імпульс I_x і потужність N_x струменя на довільній ділянці $x-x$, враховано ряд факторів і фізичних впливів, таких як t_o , μ , ψ , ψ_s .

У формулах (1)-(5) 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 – густина азоту (кг/м³) і витрата азоту (м³/хв) за нормальних фізичних умов; m_{12} , m_g , m_s – масові витрати відповідно газопорошкової суміші через сопло і газу, що викидається струменем із порожнини конвертера, а також шлаку, з'єднаного потоком, що витікає, кг/с; w_{12} , w_x – відповідно швидкість газосуспензії на виході з сопла та середньомасова швидкість комплексної течії на довільній ділянці $x-x$, 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; $\psi_s = w_s/w_1$ – коефіцієнт, що характеризує відставання швидкостей частинок шлаку від швидкості носія g_s , $g = m_g/(m_1 + m_2)$ – приєднана маса шлаку і газу з порожнини конвертера в газопорошковий струмінь; C_{p12} , C_s , C_{px} – теплоємність газосуспензії, шлаку та середня теплоємність в перерізі $x-x$ струменя, кДж/(кг·К); T_{12} , T_g , T_s – температура газосуспензії у вихідному перерізі сопла, шлаку і газу, з'єднаних струменем з порожнини конвертера, К; α_{12} , α_x – коефіцієнт кінетичної енергії потоку у вихідній секції сопла та у довільній секції $x-x$ струменя.

Індекси позначають параметри: 1 – газ-носії, 2 – частинки порошку, 12 – газова суспензія, s – шлак, який нагнітається струменем, g – нагнітаний газ із порожнини конвертера, x – у довільній ділянці конвертера надзвуковий газопорошковий струмінь.

Значення приєднаної маси g азоту з порожнини конвертера x на відстані від виходу сопла знаходили, як і в [7]:

$$g = \frac{2 \cdot r_{max} \cdot \bar{x}}{D \cdot \sigma} \cdot C_i \cdot (1 - C_i^2)^{\frac{1}{22}} \cdot (I_{1R} - I_{2R}), \quad (6)$$

де r_{max} – відносний максимальний радіус першого ствола надзвукового нерозрахованого струменя:

$$r_{max} = \left(1 + \frac{\vartheta_o}{\psi_1} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

Ψ_1 – відома функція Прандтля-Майєра, яка була розрахована за формулою

$$\Psi_1 = \frac{1}{(M_i^2 - 1)^{1/2}} \cdot \frac{q(M_i)}{q(M_{12})}, \quad (8)$$

ϑ_o – кут нахилу границі струменя:

$$\vartheta_o = \omega(M_i) - \omega(M_1) + \alpha. \quad (9)$$

Комплекс розраховувався як

$$\omega(M_i) = \sqrt{\frac{N+1}{N-1}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{(N-1)(M_i^2 - 1)}{(N+1)}} - \arctg \sqrt{M_i^2 - 1}. \quad (10)$$

Вихідні дані. Температуру гальмування газосуспензії t_0 (перед сопловим блоком) змінювали в діапазоні 25°C - 600°C , а концентрацію порошку в діапазоні $\mu = 0,2$ - 2 кг/кг. Абсолютний тиск і температуру газів (азоту) в порожнині конвертера і температуру шлаку прийняли $p_r = 0,1$ МПа, $t_r = 1300^\circ\text{C}$, а температуру шлаку $t_{ш} = 1500^\circ\text{C}$. С. Було прийнято, що густина шлаку $\rho_s = 3000$ кг/м³, теплоємність вогнетривкого порошку $C_2 = 0,65$ кДж/(кг·К), теплоємність азоту в середовищі (порожнині конвертера) $C_{pN_2} = 1,04$ кДж/(кг·К). Коефіцієнт імпульсу прийняли рівним $\beta = 1,2$, коефіцієнт ковзання фаз для порошку $\psi = w_2/w_1 = 0,7 \div 1$; для шлаку – $\psi_{ш} = w_{ш}/w_1 = 0,2 \div 0,9$, що лінійно зростає по довжині x . Витрату азоту через одне сопло приймали рівною $V_n = 210$ м³/хв за умови, що діаметр сопла в критичному $D_{кр} = 32$ мм, а у вихідному перерізі $D_1 = 49$ мм; витрата порошку $m_2 = 78,75$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг); густина азоту за нормальних умов $\rho_n = 1,25$ кг/м³. Тиск перед соплом попередньо встановлювали $p_0 = 1,25$ МПа, а потім перевіряли. Відносну довжину струменя в розрахунку прийняли $x = 30$ (крім рис. 4 і 5).

Результати розрахунків та їх аналіз. Силові характеристики течії на відстані x визначаються в першу чергу середньомасовими значеннями швидкості w_x , імпульсу I_x і потужності N_x струменя, що проникає в розплав. При взаємодії струменя з розплавом у порожнині конвертера одним із основних параметрів є середньомасова швидкість w_x .

Як впливає з рис. 2, чим вища температура t_0 газосуспензії перед соплом, тим більша відстань $x = 30$ для будь-якого коефіцієнта ковзання ψ_s шлаку і більше середньомасової швидкості w_x і температури t_x . Так, наприклад, якщо $\psi_s = 0,6$, температура t_0 зростає від 50°C до 600°C , потім швидкість w_x зростає від 320 м/с до 500 м/с, а температура t_x зростає від 560°C до 835°C . Збільшення швидкості w_x в $\sim 1,6$ рази дозволяє збільшити потужність N_x одного з п'яти фурменних струменів в $\sim 2,6$ рази. Видно, що потрапляння шлаку в струмінь сповільнює його (рис. 2). Збільшення ψ_s від 0,2 до 1 означає розгін шлакових частинок до струминної швидкості ($\psi_s = 1$) і, з цієї причини, розсіювання енергії. Так, якщо ψ_s зростає від 0,2 до 0,8, то, наприклад, при $t_0 = 400^\circ\text{C}$ швидкість w_x зменшується від 480 м/с до 425 м/с, а температура t_x зростає від 725°C до 765°C .

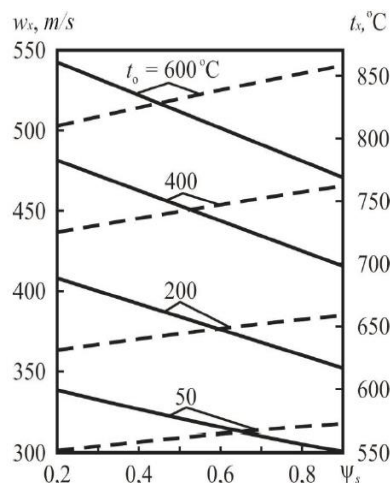


Рис. 2 – Залежність середньомасових значень швидкості w_x (—) і температури t_x (---) від коефіцієнта ковзання шлаку ψ_s при різних температурах гальмування t_0 . Вихідні дані: $t_g = 1300^\circ\text{C}$; $g_s = 0,2$; $\psi = 0,8$; $V_n = 100$ м³/хв; $D_{кр} = 32$ мм; $D_1 = 49$ мм; $m_2 = 37,5$ кг/хв; при $\mu = 0,3$ кг / кг $x = 30$

Однією з найважливіших характеристик силової дії є імпульс струменя I_x в момент його введення в шлаковий розплав. Цей параметр входить у всі розрахункові формули для визначення глибини залягання струменя h_x в шлаку. Чисельні розрахунки показали (рис. 3), що для будь-якої концентрації μ порошку в газосуспензії, чим вище його температура t_0 перед сопловим блоком, тим більший імпульс I_x . Так, наприклад, якщо концентрація $\mu = 2$ кг/кг, то підвищення t_0 від 100°C до 600°C дає можливість збільшити імпульс I_x струменя з 1,47 кН до 2,35 кН. За цих же умов густина ρ_{12} зменшується з 6,9 кг/м³ до 4,6 кг/м³.

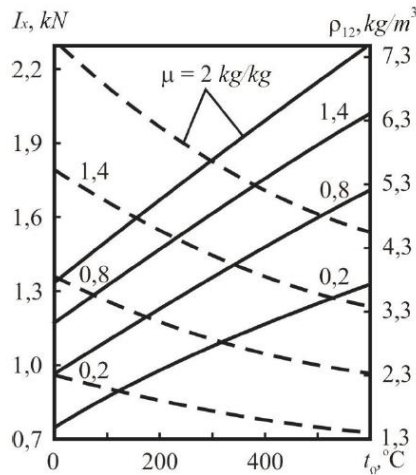


Рис. 3 – Вплив концентрації порошку μ на імпульс I_x (—) струменя в поперечному перерізі $x = 30$ та густину ρ_{12} (---) газопорошкової суміші у вихідній секції сопла Лавалю зі зміною температури гальмування t_0 . Вихідні дані: $t_g = 1500^\circ\text{C}$; $g_s = 0,3$; $\psi = 0,8$; $\psi_s = 0,8$; $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$; $D_{кр} = 32 \text{ мм}$; $D_1 = 49 \text{ мм}$

З рис. 3 видно, що імпульс I_x також значно зростає зі збільшенням концентрації μ . Так, якщо $t_0 = 400^\circ\text{C}$, то збільшення μ від $0,2 \text{ кг/кг}$ до 2 кг/кг призводить до збільшення імпульсу I_x від $1,2 \text{ кН}$ до 2 кН , і за тих же умов густина ρ_{12} зростає від $1,5 \text{ кг/м}^3$ до $5,3 \text{ кг/м}^3$.

Найважливішою з них є температура гальмування t_0 (рис. 4). Чисельні розрахунки показали, що внаслідок зменшення середньої швидкості w_x по довжині імпульс I_x також зменшується при будь-якому t_0 . Наприклад, при $t_0 = 200^\circ\text{C}$ і зміні тривалості від 0 до 30 імпульс I_x зменшується від $1,6 \text{ кН}$ до $0,92 \text{ кН}$. Також видно, що $x = 25$ підвищення температури t_0 від 50°C до 600°C дозволяє збільшити імпульс I_x від $0,85 \text{ кН}$ до $1,5 \text{ кН}$. Що стосується середньомасової температури t_x , то враховуючи те, що зі збільшенням струменя викидається більш гарячий газ порожнини конвертора, його середньомасова температура t_x дещо підвищується. Якщо газопорошкову суміш нагріти до сопла до температури t_0 , то, наприклад, $x = 25$ збільшення t_0 від 50°C до 600°C призводить до підвищення температури t_x від 840°C до 1100°C .

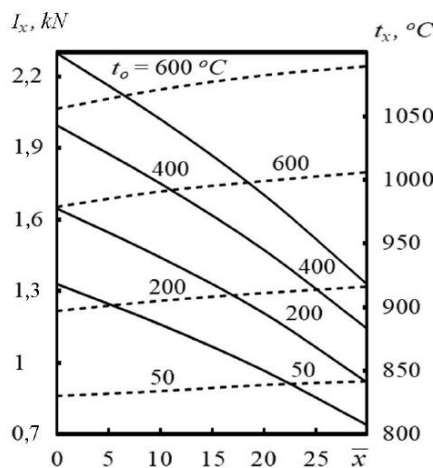


Рис. 4 – Вплив температури гальмування t_0 на середньомасовий імпульс I_x (-) і температуру t_x газопорошкового струменя на різних відстанях від виходу з сопла. Вихідні дані: $\mu = 0,3 \text{ кг/кг}$, $\psi = 0,8$, $\psi_s = 0,8$, $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$, $D_{кр} = 32 \text{ мм}$, $D_1 = 49 \text{ мм}$, $m_2 = 37,5 \text{ кг/хв}$, $t_g = 1500^\circ\text{C}$, $\rho_n = 1,25 \text{ кг/м}^3$, $p_0 = 1,25 \text{ МПа}$

Найбільш суттєво на потужність N_x газопорошкового струменя, що втікає в розплав, впливає нагрівання газодисперсного потоку до температури t_0 перед фурменними соплами (рис. 5).

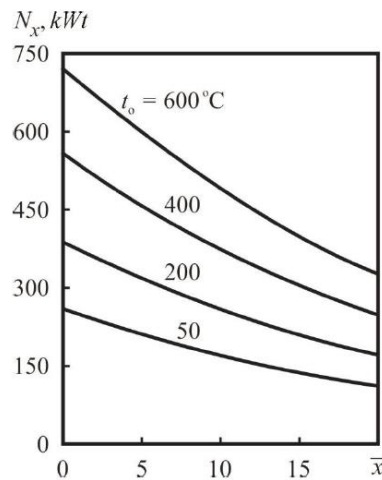


Рис. 5 – Залежність потужності N_x газопорошкового потоку від температури гальмування t_0 на різній відстані від зрізу сопла Лаваля. Вихідні дані: $r_0 = 1,25$ МПа, $V_n = 100$ м³/хв, $\rho_n = 1,25$ кг/м³, $m_2 = 37,5$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг), $D_{кр} = 32$ мм, $D1 = 49$ мм, $t_g = 1500^\circ\text{C}$, $\psi = 0,8$, $\psi_s = 0,8$

Видно, що на будь-якій відстані від виходу сопла зменшується потужність N_x , причому чим інтенсивніше, чим вище температура t_0 . Так, якщо $t_0 = 600^\circ\text{C}$, то на довжині $x = 20$ калібрів потужність N_x газопорошкового струменя зменшується від 720 кВт до 330 кВт, а якщо $t_0 = 50^\circ\text{C}$, то потужність N_x зменшується від 255 кВт ($x = 0$) до 100 кВт ($x = 20$).

Чисельні розрахунки показали, що чим далі від виходу сопла (більше), тим менше потужність N_x струменя при будь-якій температурі t_0 (рис. 5). Так, якщо газову суспензію перед сопловим блоком нагріти до температури $t_0 = 400^\circ\text{C}$, то при зміні від 0 до 20 калібрів потужність N_x струменя зменшується з 550 кВт до 250 кВт. Підвищення температури t_0 від 50°C до 600°C , наприклад, $x = 20$, призводить до збільшення потужності N_x від 120 кВт до 325 кВт (~ 2,75 рази).

Адекватність моделі. Оскільки провести експеримент в порожнині перетворювача складно, можна перевірити результати чисельних розрахунків, застосувавши метод особливих випадків. Отже, якщо:

- параметри потоку азоту (без порошку) розглядаються на виході з сопла, тоді $\mu = 0$, $x = 0$, $g = 0$, $g_s = 0$ вихід із сопла в розрахунковому режимі (тобто $n = 1$), то, як впливає з рівняння (3), швидкості $w_x = w_1$, що підтверджує правильність рішення при визначенні w_x ;

- якщо коефіцієнт ковзання $\psi_s \rightarrow 1$, то на прискорення частинок шлаку витрачається додаткова енергія і її середньомасова швидкість w_x зменшується при будь-якій температурі t_0 , що є закономірним (рис. 2);

- якщо концентрація порошку в газовій суспензії збільшується, то при будь-якій температурі t_0 імпульс I_x зростає, що не потребує доказів (рис. 3);

- підвищується температура газу t_0 , тоді зростає і швидкість w_x ; у зв'язку з цим при будь-якій концентрації μ імпульс I_x зростає (I_x), що не потребує експериментальної перевірки (рис. 2-4).

Висновки і рекомендації:

1. При розробці системи чисельного моделювання було враховано: вплив концентрації μ вогнетривкого порошку, нагрівання азоту перед фурмою до температури t_0 , величини прилипання газу g з порожнини конвертора, температури t_g газів із зовнішнього середовища, приєднаної маси g_s шлаку до нерозрахованого надзвукового струменя, а також коефіцієнт ковзання ψ частинок порошку відносно газа-носія, коефіцієнт ковзання частинок шлаку ψ_s до газу струменя тощо за параметрами в довільний поперечний переріз xx – температура t_x , коефіцієнт відхилення

від розрахунку n , імпульс I_x , потужність N_x , відповідно до яких розраховується глибина h_x розпилення шлаку і діаметр D_x входу струменя в розплав.

2. Спільне рішення ~ 50 рівнянь (повідомлення 1 і 2) дозволяє наочно представити картину взаємодії надзвукового струменя з ударними хвилями і розплавом, а також розробити рекомендації щодо підвищення енергоефективності шлакодувної технології.

3. Показано, що нагрівання газової суспензії до $t_0 = 600^\circ\text{C}$ дозволяє збільшити потужність струменя (з низькою концентрацією μ порошку) з 262 кВт до 723 кВт, тобто $\sim 2,8$ рази.

4. Суворо науковий підхід дозволяє на роки скоротити час впровадження проривних технологій. Розроблені пропозиції щодо інтенсифікації енергозбереження в металургії дають можливість отримати економічний ефект 1:100 - 1:200.

Перелік використаних джерел:

1. 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>.
2. 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>.
3. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Influence 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>.
4. Analysis of the flow of gas / powder mixture in the oxygen converter lance nozzles / Kuzemko R.D., Sinelnikov V.O., Mastykash V.V., Kalisz D. *Journal of Machine Constuction and Maintenance*. 2018. Vol. 108. No. 1. Pp. 111-117.
5. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы / Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Устинов В.А., Герашук Ю.Д. *Металл и литье Украины*. 2009. № 1-2. С. 9-15.
6. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Modeling viscosity of converter slag. *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15. No. 4. Pp. 119-124.
7. 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.
8. Supersonic Jets Injected into Converter Slag / E.V. Protopopov, R.F. Kalimullin, A.G. Chernyatevich, P.S. Kharlashin, N.A. Chernysheva. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 10. Pp. 711-715. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212100142>.
9. Adding slag to a supersonic jet in an oxygen converter / Kharlashin P.S., Kuzemko R.D., Protopopov E.V., Feyler S. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 45. No. 2. Pp. 100-104. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091215020084>.
10. Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter / Sinelnikov V.O., Kalisz D., Žak 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>.

References:

1. 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.
2. 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: 10.1007/s11148-018-0128-1.
3. 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.
4. R.D. Kuzemko, V.O. Sinelnikov, V.V. Mastykash, and D. Kalisz, «Analysis of the flow of gas / powder mixture in the oxygen converter lance nozzles», *Journal of Machine Constuction and Maintenance*, vol. 108, no. 1, pp. 111-117, 2018.

5. 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 Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 1-2, pp. 9-15, 2009. (Rus.)
6. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Modeling viscosity of converter slag», *Archives of foundry engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 119-124, 2015.
7. 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: Taylor & Francis Group, A Balkema Book Publ., 2015.
8. E.V. Protopopov, R.F. Kalimullin, A.G. Chernyatevich, P.S. Kharlashin, and N.A. Chernysheva, «Supersonic Jets Injected into Converter Slag», *Steel in Translation*, vol. 42, no. 10, pp. 711-715, 2012. doi: 10.3103/s0967091212100142.
9. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, E.V. Protopopov, and S. Feyler, «Adding slag to a supersonic jet in an oxygen converter», *Steel in Translation*, vol. 45, no. 2, pp. 100-104, 2014. doi: 10.3103/s0967091215020084.
10. 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: 10.1088/1757-899x/461/1/012078.

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

Стаття надійшла 13.02.2023

Стаття прийнята 02.04.2023

УДК 621.774.2

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300060

© Григоренко В.У.¹, Овсяников В.В.²

РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМУВАННЯ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ МЕТАЛУ У ВИРОБНИЦТВІ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКИХ ДІАМЕТРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСПАНДУВАННЯ

З 2020 року в Україні ТОВ НВП «УКРТРУБОІЗОЛ» почало експлуатувати технологічну лінію виробництва труб великого діаметру (ТВД) для магістральних нафто- і газопроводів з гідромеханічним експандером. З 2023 року в Україні припинили дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76. Постановка проблеми. Потрібні українські стандарти. Потрібно визначення раціональних значень деформації та ефективності експандування зі зниження залишкових напружень в метали труб. Ціль. Розробка українських стандартів з виробництва ТВД та визначення впливу експандування на залишкові напруження. Методика. Застосований метод розрізання кілець. Результати. Розроблено та введено в дію за участю автора – ДСТУ 9219:2023; ДСТУ 9218:2023 та ТУ 24.2-05757883-095:2022. Досліджені труби діаметром 630 мм, зі стінкою 8 мм, зі сталі S335 та з гарячекатаного рулонного листа. Розкриття між повздовжніми кромками трубної заготовки після гібки становило 70-80 мм. Для кільця після зварки розкриття склало 180 мм, а для кільця експандованих на 0,8 %, 1,2 % та 0,4 % -58-53 мм. Це вказує на те, що залишкові напруження

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1809-2842

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8458-176X, vitaliy.ovsyaniuk29@gmail.com