

С. І. Семикін, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7365-2259

Т. С. Голуб, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

Л. С. Молчанов, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6139-5956

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМЕНІВ, ЩО ВИТІКАЮТЬ ІЗ СОПЕЛ СКЛАДЕНОГО ТИПУ

Анотація. Актуальною для кисневого конвертування задачею є поліпшення екологічних показників за рахунок зниження викидів оксидів вуглецю у атмосферу, що можливо за рахунок зниження витрат чавуну із підвищенням можливості переробки металобрухту. Для цього необхідно підвищення тепловмісту ванни, що можливо за рахунок використання фурменних пристроїв, оснащених спеціальними соплами. У статті наведено результати дослідження та аналізу використання з цією метою складених сопел когерентного типу. Такі сопла являють собою сопло для подачі кисню, що складається із центрального сопла та оточуючого його кільцевого периферійного сопла. Проведені фізичні та аналітичні дослідження особливостей витікання струменів газу із складених сопел когерентного типу різної конструкції (при розмірі периферійної частини від 0,07 до 0,47 калібрів центрального сопла) в умовах продувки 2М дозволили встановити, що складена конструкція за деяких умов може додавати додаткових перешкод та обмежень розвитку центрального струменя (при ширині периферійної частини 0,07 – 0,17 калібрів), чи надавати додаткового імпульсу при більшій ширині периферійної частини. Це пов'язано із особливостями формування струменя на початковій ділянці розвитку. Тому необхідно брати до уваги геометричне розташування центральної та периферійної частин відносно одне одного для отримання необхідного результату формування комплексного струменя із заданими властивостями.

За результатами аналітичного дослідження залежності ваги струменя, що витікає із складених сопел когерентного типу, встановлений математичний вираз для розрахунку коефіцієнта витрати енергії струменя при проходженні крізь сопло та вираз для розрахунку ваги струменя, як необхідного показника імпульсу, що відповідає за його силові та проникні властивості, із використанням яких можливо прогнозувати характеристики дослідженого складеного сопла когерентного типу за його геометричною конструкцією та дуттьовими показниками.

Ключові слова: кисневий конвертер, верхня продувка, складені сопла, вага струменя, втрати енергії струменя.

Посилання для цитування: Семикін С. І., Голуб Т. С., Молчанов Л. С. Аналітичне дослідження характеристик струменів, що витікають із сопел складеного типу. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 208-217. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-208-217.

Динамічна зміна ринку шихтових матеріалів у металургії та енергоресурсів потребують відповідної реакції щодо пристосування всіх галузей чорної металургії до умов дефіциту сировинних ресурсів та енергоносіїв, несталіх показників їх якості. Зокрема, зазначений аспект, стосується й киснево-конвертерного процесу, як основного металургійного переділу України з точки зору виплавки рідкого напівпродукту [1-2]. При цьому, актуальними для нього задачами є як поліпшення екологічних показників (зниження викидів оксидів вуглецю у атмосферу), так й зниження витрат чавуну із підвищенням можливості переробки металобрухту, що, на думку провідних металургійних спеціалістів, також сприятиме підвищенню екологічності виробництва [3-7].

Одним з високоефективних енерго-ресурсозберігаючих напрямків, що дозволяють досить швидко й без значних фінансових витрат істотно поліпшити техніко-економічні показники виробництва конвертерної сталі є удосконалення режимів продувки металеві ванни технологічними газами, що безпосередньо відображається у розробці нових конструкцій продувних пристроїв. Відомо, що для підвищення імпульсу струменя, який впливає на металеву ванну при виході із сопла, наприклад, у електрометалургії, використовують когерентні сопла, що мають вигляд центрального сопла, яке формує основний кисневий струмінь, навколо якого розташовано кільцеве сопло, що формує захисний потік із природного газу, чи іншого палива, яке під час продувки горить й таким чином формує захисний шар для основного потоку [8-12]. Результати дослідження з визначення доцільності використання зазначеного типу сопел для умов продувки у кисневих конвертерах (із подачею кисню по обох каналах сопла) представлено у даній статті.

Методика проведення досліджень. Киснево-конверторний спосіб виробництва рідкого напівпродукту є досить складним й багато етапним, та характеризується екстремально високими температурами, що ускладнюють його пряме дослідження. З погляду на це доступним й досить розповсюдженим залишається метод проведення натурального фізичне моделювання окремих операцій процесу [13-14]. Тому проведене дослідження базувалось на здійсненні фізичного моделювання та аналіз особливостей струменів, що витікають із складених сопел когерентного типу з різним співвідношенням складових частин.

Сопла, що використовувалося для проведення експериментів, представляли собою сопла циліндричного типу оснащені циліндричною вставкою з повздовжнім отвором. При цьому їх вісі співпадали (рис.1). Вставка формувала основний потік газу, а між вставкою та внутрішньою поверхнею зовнішнього сопла формувався периферійний струмінь газу. Для проведення досліджень використовувалися сопла з наступними параметрами: d_3 був для всіх сопел однаковим й дорівнював $3,5 \times 10^{-3}$ м; d_1 та d_2 дорівнювали відповідно парами: $1,6 \times 10^{-3}$ м та $2,0 \times 10^{-3}$ м, $1,9 \times 10^{-3}$ м та

$2,4 \times 10^{-3} \text{ м}$, $2,2 \times 10^{-3} \text{ м}$ та $2,6 \times 10^{-3} \text{ м}$, $2,4 \times 10^{-3} \text{ м}$ та $2,7 \times 10^{-3} \text{ м}$, $2,6 \times 10^{-3} \text{ м}$ та $2,9 \times 10^{-3} \text{ м}$, $2,8 \times 10^{-3} \text{ м}$ та $3,1 \times 10^{-3} \text{ м}$. Таким чином досліджувалося щільне периферійне сопло із шириною $0,75 - 0,20 \times 10^{-3} \text{ м}$, що відносно центрального сопла складало, відповідно у калібрах: $0,47$; $0,29$; $0,20$; $0,17$; $0,12$; $0,07$.

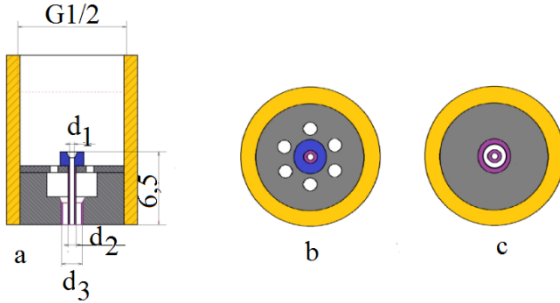
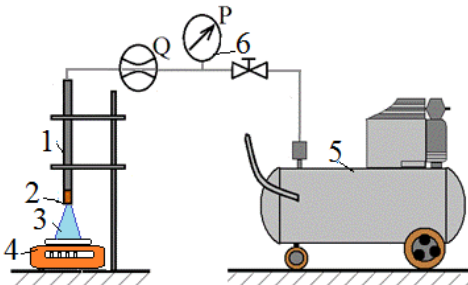


Рисунок 1 – Схематичне зображення експериментального складеного сопла когерентного типу: а – головний переріз, б – вид зверху, с- вид знизу.

За допомогою електронних вагів ТВЕ-6-01 (рис. 2) було досліджено вагу, що здійснює газовий струмінь при витіканні з сопла на тензодатчик, для складених сопел когерентного типу у порівнянні із продувкою крізь еквівалентне циліндричне сопло з діаметром $3,2 \times 10^{-3} \text{ м}$ (дослідження впливу розділення сопла на два потоки), та циліндричне сопло діаметром d_1 (дослідження впливу додаткового потоку різної ширини) за умов продувки при сталій витраті повітря із тиском від 200 до 450 кПа (що відповідає умовам 2М – наближеним до промислових умов продувки) при різній висоті розташування продувної фурми, що оснащена дослідним наконечником, відносно вагів.

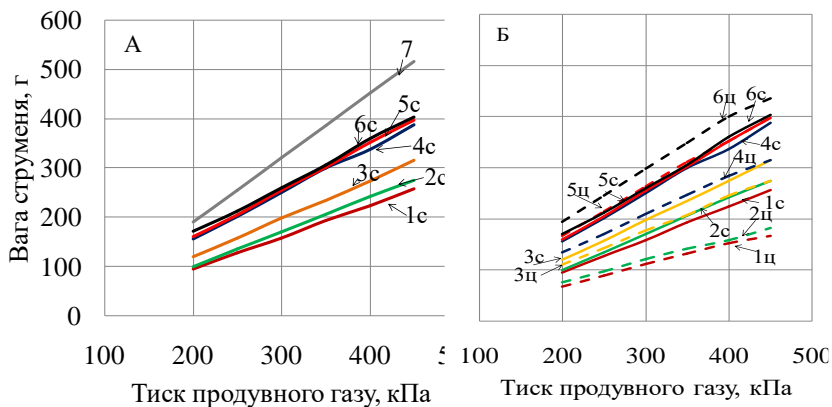


1 – продувна фурма,
2 – дослідний наконечник з соплом,
3 – струмінь продувного газу,
4 – електронні ваги ТВЕ-6-01,
5 – компресор,
6 – манометр.

Рисунок 2 – Установки для вимірювання ваги струменя.

Результати досліджень. За результатами проведених досліджень було встановлено, що розділення сопла на частини центральною вставкою у порівнянні із циліндричним соплом еквівалентного діаметру значно знижує вагу струменя: на величину від 50% для варіанту «1с» (центральне

сопло $1,6 \times 10^{-3}$ м, периферійна частина 0,47 калібрів) до 20% для варіанту «6с» (центральне сопло $2,8 \times 10^{-3}$ м, периферійна частина 0,07 калібрів) (на рис. 3 А для прикладу наведено порівнянні при висоті розташування фурми на рівні 40 калібрів, що відповідає робочому режиму продувки у промисловому варіанті). Причому встановлено, що показник зменшення ваги струменя для конкретного типу складеного сопла сталий (майже не залежить від тиску газу, що подається).



1с – 6с – складені сопла із діаметром центральної частини $1,6 \times 10^{-3}$ м; $1,9 \times 10^{-3}$ м; $2,2 \times 10^{-3}$ м; $2,4 \times 10^{-3}$ м; $2,6 \times 10^{-3}$ м; $2,8 \times 10^{-3}$ м та периферійною частиною рівною 0,47; 0,29; 0,20; 0,17; 0,12; 0,07 калібрів відповідно; 1ц – 6ц – циліндричні сопла діаметром $1,6 \times 10^{-3}$ м; $1,9 \times 10^{-3}$ м; $2,2 \times 10^{-3}$ м; $2,4 \times 10^{-3}$ м; $2,6 \times 10^{-3}$ м; $2,8 \times 10^{-3}$ м відповідно.

Рисунок 3 – Результати дослідження ваги струменів, що витікають із сопел різної конструкції при тиску продувального газу 200-450кПа та розташуванні фурми на рівні 40 калібрів сопла від тензодатчика вагів: А – у порівнянні із продувкою крізь сопло еквівалентного діаметру (7), Б – у порівнянні із продувкою крізь сопла із діаметром, рівним діаметру центральної частини.

Зіставлення результатів зважування струменів, що витікають зі складених сопел, із продувкою крізь циліндричні сопла діаметром, рівним діаметру центральної частини складених сопел (рис. 3.Б) показало, що при додаванні периферійної частини до сопла рівної 0,47 - 0,17 калібрів центрального сопла вага струменя збільшується тим більше, чим більша частина навколишньої периферійної вставки: на величину від 53 % при діаметрі центральної частини $1,6 \times 10^{-3}$ м (0,47 калібрів периферійна частина) до 23 % при діаметрі центральної частини $2,4 \times 10^{-3}$ м (0,17 калібрів периферійна частина) (на рис. 2 Б наведено у якості приклада для умов продувки при розташуванні фурми на відстані 40 калібрів від тензодатчика вагів). Проте, в умовах периферійної вставки 0,12 - 0,07 калібрів навпаки відмічено зниження ваги струменя на величину до 5 % при діаметрі центральної частини $2,6 \times 10^{-3}$ м (периферійна

частини 0,12 калібрів) та до 10 % при діаметрі центральної частини $2,8 \times 10^{-3}$ м (периферійна частина 0,07 калібрів).

Встановлену особливість, перш за все, можна пояснити розглянувши детально що відбувається при виході струменя із складеного сопла. Відомо, що струмінь газу «розривається» при витіканні із сопла через значну різницю тиску в середині сопла та ззовні [15]. Тобто геометричні розміри струменя на початковому етапі перевищують у 1,5- 2 рази діаметр самого сопла. Цей процес є необхідним, бо саме він створює необхідний поштовх для подальшого формування та розповсюдження струменя (циклічної зміни тиску в середині струменя, що за умов надзвукової продувки призводить до формування ущільнень – дисків Маху). За умов витікання зі складених сопл центрального струміна також повинен мати умови для розширення на початковій ділянці. Проте, додатковими дослідженнями було встановлено, що струмінь, який витікає із кільцевого сопла малої ширини (до 1×10^{-3} м) майже не розширюється на початковій ділянці й далі струмінь газу стискається за рахунок розрідження, що формується в середині струменя. Тобто, центральний струмінь газу оточує потік периферійного струменя, що створює кордон для струменя у межах зовнішніх параметрів периферійної частини сопла (для умов проведених досліджень це стала величина $d_3 = 3,5 \times 10^{-3}$ м). І, якщо, для умов продувки крізь складені сопла із діаметром центральної частини $1,6 \times 10^{-3}$ м та $1,9 \times 10^{-3}$ м струмені внутрішній та периферійний накладаються один на одного майже у геометричних межах сопла, то для умов продувки крізь сопла із діаметром центральної частини $2,6 \times 10^{-3}$ м та $2,8 \times 10^{-3}$ м можливості для необхідного розширення майже у 1,5 рази менші, що, вочевидь, й визначає зниження ваги струменя у цих умовах при всіх сталих показниках по відношенню до продувки крізь циліндричне сопло із діаметром, рівним центральній частині.

Крім того, необхідно відзначити, що струмінь, який витікає крізь складене сопло проходить повз три поверхні: поверхня циліндра, що оточує центральну частину, та поверхня кільця, що також чинять перешкоду й знижують енергію струменя у порівнянні із продувкою крізь еквівалентне сопло $3,2 \times 10^{-3}$ м. Для встановлення емпіричної залежності коефіцієнту витрат при продувці крізь складені сопла були аналітично оброблені результати виміру ваги струменя, що витікає із складених сопл різної конструкції при різних дуттьових показниках на засадах принципів газової динаміки. Відомо, що в соплових каналах, які мають порівняно малий розмір із магістраллю подачі газів теплообмін із довкіллям практично відсутній, тому процес протікання газів крізь сопла вважається адіабатним [15-16]. Тоді, в зазначених умовах, справедливе співвідношення:

$$V = V_0 (P_0 / P)^k, \quad (1)$$

де V_0 , V – обсяг газу на вході та на виході сопла, м³; P_0 , P – тиск газу на вході та на виході сопла.

Робота зміни тиску в потоці при незмінних початкових параметрах газу (P_0, V_0) відповідає рівнянню:

$$I_0 = \int_{P_0}^P -VdP = \int_P^{P_0} V_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^k dP = \frac{k}{k-1} P_0 V_0 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right), \quad (2)$$

а швидкість витікання на виході із сопла розраховується за формулою:

$$w = \phi \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_0 V_0 \left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (3)$$

де ϕ - коефіцієнт швидкості.

Для подальшого аналізу було використане рівнянням нерозривності потоку:

$$\frac{G}{S} = \frac{w}{V}, \quad (4)$$

де величина G/S – питома масова секундна витрата газу крізь одиницю площі поперечного перерізу сопла.

Виразивши питомий об'єм газу в даному перерізі соплового каналу з рівняння адиабати (1) й підставивши його та вираз швидкості (3) у рівняння (4), отримаємо вираз масової витрати:

$$G = \rho \mu S \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_0 V_0 \left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (5)$$

де ρ – щільність газу, $\text{м}^3/\text{кг}$; μ – коефіцієнт витрати, S – площа перетину сопла, м^2 .

Рівняння (5) виражає функціональну залежність між питомою витратою газу та відношенням P/P_0 , яке позначають як ε . Критичне значення ε визначається як перша похідна функції (5), прирівняної до нуля:

$$\varepsilon_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

та для ідеального газу з постійними ізобарними та ізохорними теплоємностями вона постійна й для двоатомного газу $k=1,4$, а $\varepsilon_{кр}=0,528$.

Підставив $\varepsilon_{кр}$ у вираз швидкості витікання (3), отримаємо рівняння для розрахунку критичної швидкості газу:

$$w_{кр} = \phi \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_0 V_0}, \quad (7)$$

а масова витрата

$$G_{кр} = \mu S \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{P_0}{V_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}. \quad (8)$$

При витікання без тертя $\mu=1$.

Зазвичай коефіцієнти витрати приймають рівними 0,9, проте, як показали результати лабораторних досліджень, для реальних умов витікань із сопел різної конструкції вони можуть значно відрізнятися. Так для складених сопел когерентного типу коефіцієнт витрати ($K_{заг}$), що характеризує ступінь втрати енергії струменя при проходженні його крізь сопло був знайдений емпірично за результатами фізичного виміру ваги струменя при різних умовах продувки (вираз 9) й залежить від геометричних характеристик сопел (співвідношень площин вихідного перетину та внутрішніх площин сопла).

Також було визначено емпіричний вираз залежності ваги струменя, що витікає із складених сопел (вираз 12), від параметрів продувки (тиску, геометричних особливостей сопла та положення фурми відносно поверхні, на яку струмінь чинить вплив), що є ключовим показником імпульсу та сили струменя та характеризує його можливості щодо впливу на рідку ванну.

$$K_{заг} = \frac{K_u S_u + K_n S_n}{S_u + S_n}, \quad (9)$$

де S_u та S_n - площі перетину виходу центральної та периферійної частин сопла, K_u та K_n - коефіцієнти витрати для центральної та периферійної частин, що знаходяться за формулами (10) та (11).

$$K_u = 0,72 d_1^{0,1092}, \quad (10)$$

$$K_n = \frac{0,77(d_3^2 - d_2^2)^{0,5546}}{d_3 + d_2}, \quad (11)$$

де d_1 – діаметр центральної частини складеного сопла, м; d_2 та d_3 діаметри внутрішній та зовнішній периферійної частини сопла, м.

$$G = 0,34 \cdot P \cdot h_\phi^{0,22} \cdot K_{заг} \sqrt{d_1^2 + d_3^2 - d_2^2} \cdot R^{2,0}, \quad (12)$$

де P – тиск газу, що подається, перед соплом, кПа; h_ϕ – положення фурми відносно ванни у спокійному стані.

Висновки

Проведені фізичні та аналітичні дослідження особливостей витікання струменів газу із складених сопел когерентного типу різної конструкції дозволили встановити, що складена конструкція за деяких умов може додавати додаткових перешкод та обмежень розвитку центрального струменя, тому необхідно брати до уваги геометричне розташування центральної та периферійної частин відносно одне одної для отримання

необхідного результату формування комплексного струменя із заданими властивостями.

За результатами аналітичного дослідження залежності ваги струменя, що витікає із складених сопел когерентного типу, встановлений математичний вираз для розрахунку коефіцієнта витрати енергії струменя при проходженні крізь сопло та вираз для розрахунку ваги струменя, як необхідного показника імпульсу, що відповідає за його силові та проникні властивості, із використанням яких можливо прогнозувати характеристики дослідженого складеного сопла когерентного типу за його геометричною конструкцією та дуттьовими показниками.

Перелік посилань

1. Cappel J., Ahrenhold F., Egger M. W., Hiebler H., Schenk J. 70 Years of LD-Steelmaking - Quo Vadis? *Metals*. 2022. Vol.12, P. 912-936.
2. 2021 Steel Statistical Yearbook published. <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/2021-steel-statistical-yearbook-published/>.
3. Internal Evaluation. Thyssenkrupp SE Based on Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), EDGARv5.0 FT2018. 2020. Available from: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>.
4. Green LD (BOF) Steelmaking - Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate / B. Voraberger, G. Wimmer, D. U. Salgado, E. Wimmer, K. Pastucha, A. Fleischanderl // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 466-483.
5. Wimmer G., Pastucha K., Voraberger B. Increase of Scrap Rate in Converter Steelmaking. *Steel Tech*. 2021. Vol. 15. P. 28–35.
6. Ryman Ch., Larsson M. Reduction of CO₂ Emissions from Integrated Steelmaking by Optimized Scrap Strategies: Application of Process Integration Models on the BF–BOF System. *ISIJ International*. 2006. Vol. 46 (12). P. 1752-1758.
7. Role of Scrap Recycling for CO₂ Emission Reduction in Steel Plant: A Model Based Approach / M. Sahoo, S. Sarkar, A. C. R. Das G.G. Roy // *Steel Research International*. 2019. Vol. 90 (8), 1900034.
8. Fundamental Aspects of Coherent Gas Jets / B. Sarma, P. C. Mathur, R. J. Selines and J. E. Anderson // *Electric Furnace Conf. Proc., Iron and Steel Society, Louisiana*, 1998. Vol. 56. P. 657–72.
9. Zhao F., Zhu R. and Wang W. Characteristics of the Supersonic Combustion Coherent Jet for Electric Arc Furnace Steelmaking. *Materials*. 2019. Vol. 12, P. 3504-3518.
10. Zhao F., Zhu R., Wang W. Characteristics of a coherent jet enshrouded in a supersonic fuel gas. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. Iss. 2. P.173-180.
11. Malfa E., Giavani C., Memoli F. Numerical simulation of a supersonic oxygen lance for industrial application in EAFs. *MPT Int*. 2005. Vol. 28. P. 44–50.
12. Zhao F., Sun D., Zhu R. Effect of shrouding gas parameters on characteristics of supersonic coherent jet. *Metall. Mater. Trans. B*. 2017. Vol. 48. P.1807–1816.
13. Measurement methodologies for BOF cold modeling / Felipe Gonçalves, Mariana Ribeiro, Raquel Correa, Rubia Silva et al. // *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 13. P.834-856.
14. Modelling of steelmaking process / F. Concalves, M. Ribeiro, R. Correa, R. Silva, B. Braga et al. In book of D. Mazumdar, J. W.Evans. CRC Press, 2010. 484 p.

15. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Том 1.5-е изд., пореаб. и доп. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1991. 600 с.
16. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейншлин А. Е. Техническая термодинамика. Издание 4. М. : Книга по Требованию, 2013. 416 с.

References

1. Cappel J., Ahrenhold F., Egger M. W., Hiebler H., Schenk J. 70 Years of LD-Steelmaking - Quo Vadis? *Metals*. 2022. Vol.12, P. 912-936.
2. 2021 Steel Statistical Yearbook published. <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/2021-steel-statistical-yearbook-published/>.
3. Internal Evaluation. Thyssenkrupp SE Based on Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), EDGARv5.0 FT2018. 2020. Available from: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>.
4. Green LD (BOF) Steelmaking - Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate / B. Voraberger, G. Wimmer, D. U. Salgado, E. Wimmer, K. Pastucha, A. Fleischanderl // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 466-483.
5. Wimmer G., Pastucha K., Voraberger B. Increase of Scrap Rate in Converter Steelmaking. *Steel Tech*. 2021. Vol. 15. P. 28–35.
6. Ryman Ch., Larsson M. Reduction of CO₂ Emissions from Integrated Steelmaking by Optimized Scrap Strategies: Application of Process Integration Models on the BF–BOF System. *ISIJ International*. 2006. Vol. 46 (12). P. 1752-1758.
7. Role of Scrap Recycling for CO₂ Emission Reduction in Steel Plant: A Model Based Approach / M. Sahoo, S. Sarkar, A. C. R. Das G.G. Roy // *Steel Research International*. 2019. Vol. 90 (8), 1900034.
8. Fundamental Aspects of Coherent Gas Jets / B. Sarma, P. C. Mathur, R. J. Selines and J. E. Anderson // *Electric Furnace Conf. Proc., Iron and Steel Society, Louisiana*, 1998. Vol. 56. P. 657–72.
9. Zhao, F., Zhu, R. and Wang, W. (2019) Characteristics of the Supersonic Combustion Coherent Jet for Electric Arc Furnace Steelmaking. *Materials*. 12, 3504-3518.
10. Zhao F., Zhu R., Wang W. Characteristics of a coherent jet enshrouded in a supersonic fuel gas. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. Iss. 2. P.173-180.
11. Malfa E., Giavani C., Memoli F. Numerical simulation of a supersonic oxygen lance for industrial application in EAFs. *MPT Int*. 2005. Vol. 28. P. 44–50.
12. Zhao F., Sun D., Zhu R. Effect of shrouding gas parameters on characteristics of supersonic coherent jet. *Metall. Mater. Trans. B*. 2017. Vol. 48. P.1807–1816.
13. Measurement methodologies for BOF cold modeling / Felipe Gonçalves, Mariana Ribeiro, Raquel Correa, Rubia Silva et al. // *Journal oa materials research and technology*. 2021. Vol. 13. P.834-856.
14. Modelling of steelmaking process / F. Concalves, M. Ribeiro, R. Correa, R. Silva, B. Braga et al. In book of D. Mazumdar, J. W.Evans. CRC Press, 2010. 484 p.
15. Abramovich G.N. Prikladnaia gazovaia dinamika [Applied gas dynamic]. Vol. 1. Iss. 5. Moskva: Nauka, 1991. 600 p. [in Russian].
16. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheidlin A. Ye. Tehnisheskaia termodinamika [Technical thermodynamics]: iss. 4. Moskva: Kniga po trebovaniu, 2013. 416 p. [in Russian].

S. I. Semykin, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7365-2259
T. S. Golub, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953
L. S. Molchanov, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ANALYTICAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF STREAMS FLOWING FROM NOZZLES OF COMPOUND-TYPE CONSTRUCTION

Summary. The urgent task for oxygen converter process is the improvement of environmental indicators due to the reduction of emissions of carbon oxides into the atmosphere. It is possible due to the reduction of iron consumption and the increase of the possibility of processing scrap metal. For this, it is necessary to increase the heat content of the bath that is possible due to the use of top lances equipped with special nozzles. The article presents the results of research and analysis of the use of composite nozzles of the coherent type for this purpose. Such nozzles are the nozzles for supplying oxygen, consisting of a central nozzle and an annular peripheral nozzle surrounding it. Conducted physical and analytical studies of the features of the outflow of gas jets from compound nozzles of a coherent type of different designs (with the size of the peripheral part from 0.07 to 0.47 calibers of the central nozzle) under the conditions of 2M blowing made it possible to establish that the compound design under certain conditions can add additional obstacles and limitations of the development of the central jet (with a width of the peripheral part of 0.07 - 0.17 calibers), or to provide additional impulse with a larger width of the peripheral part. This is connected with the peculiarities of the formation of the jet in the initial area of development. Therefore, it is necessary to take into account the geometric arrangement of the central and peripheral parts relative to each other to obtain the required result of forming a complex jet with specified properties. According to the results of an analytical study of the dependence of the weight of the jet flowing out of composite nozzles of the coherent type, a mathematical expression was established for calculating the energy consumption coefficient of the jet when passing through the nozzle and an expression for calculating the weight of the jet as a necessary indicator of the momentum responsible for its power and penetrating properties. Use of established expressions make it is possible to predict the characteristics of the studied composite nozzle of the coherent type based on its geometric design and pressure indicators.

Key words: oxygen converter, top blowing, composite nozzles, weight of the jet, energy loss of the jet.

For citation: Semykin S. I., Golub T. S., Molchanov L. S. Analitichne doslidzhennia kharakterystyk strumeniv, shcho vytikaiut iz sopel skladenoho typu [Analytical study of the characteristics of streams flowing from nozzles of compound-type construction]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 208-217. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-208-217.

Стаття надійшла до редакції збірника 18.10.2022 р.

Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)