

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.2

УДК 669.184

Т.С. Голуб, к.т.н., dove@email.ua

Л.С. Молчанов, к.т.н., metall729321@gmail.com

С.І. Семикін, к.т.н., с.н.с., isisemykin@gmail.com

В.В. Вакульчук, к.т.н., vvvakulchuk@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМЕНІВ, ЩО ВИТІКАЮТЬ ІЗ СОПЕЛ КОГЕРЕНТНОГО ТИПУ

*Основним керуючим фактором у кисневому конвертуванні із верхньою продувкою є струмінь кисню, що занурюється у металеву ванну та сприяє протіканню тепло-масообмінних та хімічних процесів. Притаманні струменю кисню характеристики створює наконечник фурми із соплами, які можуть відрізнятися за конструкцією залежно від задач, що вони вирішують.*

*У електрометалургійній галузі задля забезпечення глибокого проникнення струменя кисню у розплав та покращення процесів перемішування ванни використовують когерентні сопла, що складаються із центрального сопла для подачі основного кисневого струменя та навколишнього кільцевого сопла для подачі захисного газу, переважно метану. Така конструкція сопла, згідно наявним опублікованим даним, забезпечує подовження основного струменя із збереженням його імпульсу.*

*У роботі наведені результати дослідження за допомогою модифікованого рідинного манометра особливостей дії струменів, що витікають із сопел когерентного типу різної конструкції (співвідношення зовнішньої та центральної частин 25, 50 та 75 %) в умовах продувки, що відповідають умовам продувки зверху при кисневому конвертуванні. Проведене дослідження дозволило встановити, що при частці периферійної частини більше 50 % основною керуючою ланкою струменя є центральне сопло, а при меншій частці – периферійна циліндрична частина. Струмені, що витікають із сопел когерентного типу із часткою периферійної частини більше 50 %, мають більшу силу дії на рідину у порівнянні із силою дії відповідного центрального сопла, на величину від 33 до 74 % відносно. Конструкція сопел із часткою периферійної частини порядку 25 % практично не створює умов для покращення силових характеристик струменя.*

*За результатами встановлених висновків можливо рекомендувати використання сопел когерентного типу із часткою периферійної частини більше 50 % як сопел, наприклад, другого ряду верхній продувних фурм, що чинять шлакоутворюючий вплив, сприяючи кращому проникненню у розплав у порівнянні із відповідними циліндричними, які інтенсифікуватимуть процеси перемішування та формування шлаку у ванні.*

**Ключові слова:** кисневий конвертер; верхня продувка; сопла когерентного типу; конструкція сопла; сила дії струменя.

*The main controlling factor in oxygen converting with top blowing is the stream of oxygen, which penetrate the metal bath and promotes the flow of heat, mass exchange and chemical processes. The inherent characteristics of the oxygen jet are created by the nozzle tip with nozzles that may differ in design depending on the issue they solve.*

*In the electrometallurgical industry, coherent nozzles consisting of a central nozzle for supplying the main oxygen jet and a surrounding annular nozzle for supplying shielding gas, mainly methane, are used to ensure deep penetration of the oxygen jet into the melt and to improve the mixing processes of the bath. This design of the nozzle, according to available published data, ensures the elongation of the main jet while preserving its momentum.*

*The paper presents the results of a study using a modified liquid manometer of the features of the action of jets flowing out of nozzles of a coherent type of different designs (the ratio of the outer and central parts of 25 %, 50 % and 75 %) under blowing conditions that correspond to the conditions of top blowing during industrial oxygen conversion. The conducted research made it possible to establish*

*that when the share of the peripheral part is more than 50 %, the main controlling link of the jet is the central nozzle, and when the share is smaller, it is the peripheral slotted part. The jets flowing out of the nozzles of the coherent type with the share of the peripheral part more than 50 % have a greater force of action on the liquid compared to the force of action of the corresponding central nozzle, by the amount from 33 to 74 % relatively. The design of nozzles with a share of the peripheral part of the order of 25 % practically does not create conditions for improving the power characteristics of the jet.*

*According to the results of the established conclusions, it is possible to recommend the use of nozzles of the coherent type with a share of the peripheral part of more than 50 % as nozzles, for example, of the second row for top blowing lance, which have a slag-forming effect, contributing to better penetration into the melt compared to the corresponding cylindrical ones, that will intensify the processes of mixing and slag formation in the bath.*

**Keywords:** oxygen converter, top blowing, coherent type nozzle, nozzle design, jet force.

### Постановка проблеми

Під час кисневого конвертування з верхньою продувкою швидкість та інтенсивність протікання масо- та теплообмінних процесів перш за все залежить від особливостей дуттьових параметрів. При сталій витраті кисню, що регламентується технологічною інструкцією та визначається можливостями газопроводу підприємства, керуючим чинником при виробництві сталі слугує положення фурми відносно рідкої ванни та конструкція сопел фурменого наконечника [1—3]. Останні використовуються для створення особливих умов витікання газу для забезпечення якісного проникнення та перемішування ванни, швидкого утворення на поверхні шлакової фази, що чинитиме рафінувальну дію та захистить від втрат металу із бризками та пилом, та забезпечить допалювання вихідних газів CO до CO<sub>2</sub>.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На теперішній час існує багато різновидів конструкцій сопел [4—5]. Проте при використанні найвдаліших з них тільки 2 % енергії передається від кисневої фурми до ванни [6—7], причому більшість втрат відбувається на межі розподілу газ-рідина. В зазначеному контексті особливе місце займають складені сопла, що мають будову з декількох елементів, які разом створюють умови для вирішення різних завдань [8—9]. Звичайні надзвукові струмені, що витікають із сопел Лавала мають обмеження за довжиною потенціального ядра струменя, що чинить силовий вплив на ванну та створює значне проникнення і перемішування ванни. У той же час складені сопла когерентного типу мають подвійну структуру: центральний надзвуковий потік огорнуто периферійним кільцевим струменем, що зменшує захоплення надзвуковим основним струменем кисню зовнішнього навколишнього середовища, що чинить ефект гальмування, затримуючи ослаблення швидкості основного струменя кисню та підвищуючи ударну здатність взаємодії струменя з розплавом [8—11]. Крім того за даними [12—14] глибина лунки та сила впливу струменя збільшується із збільшенням витрати кисню на периферійну частину (на 6 % при збільшенні у 1,8 рази витрати кисню), а згасання швидкості основного струменя кисню відбувається повільніше та довжина ядра основного струменя кисню збільшується на 30 %.

### Формулювання мети дослідження

Проведення дослідження впливу умов формування струменів когерентного типу (частки периферійної частини та тиску, що подається на неї) на силові показники струменя (у тому числі у порівнянні із циліндричними соплами) задля визначення можливості та доцільності їх використання при продувці зверху для умов кисневого конвертування.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження проведено за допомогою модифікованого рідинного манометра та методики, запропонованих у [15]. Для дослідження були виготовлені сопла когерентного типу з часткою периферійної частини 25 % (діаметр центральної частини  $2,8 \times 10^{-3}$  м), 50 % (діаметр центральної частини  $2,4 \times 10^{-3}$  м) та 75 % (діаметр центральної частини  $1,6 \times 10^{-3}$  м) із загальним та роздільним підведенням газів до кожної частини для оцінки впливу витрати, що подається на периферійну частину на загальні силові показники струменя. Особливістю цих сопел було те, що вони мали однаковий діаметр зовнішньої частини сопла ( $3,5 \times 10^{-3}$  м) та однаковий еквівалентний діаметр ( $3,2 \times 10^{-3}$  м). При дослідженні сопел з роздільною подачею газу повітря подавався

із обраним сталим показником тиску на центральну частину, а на периферійну — зі змінним тиском від 50 до 400 кПа. Робота дослідних сопел порівнювалася із роботою циліндричних сопел діаметром 2,8, 2,4 та  $1,6 \times 10^{-3}$  м.

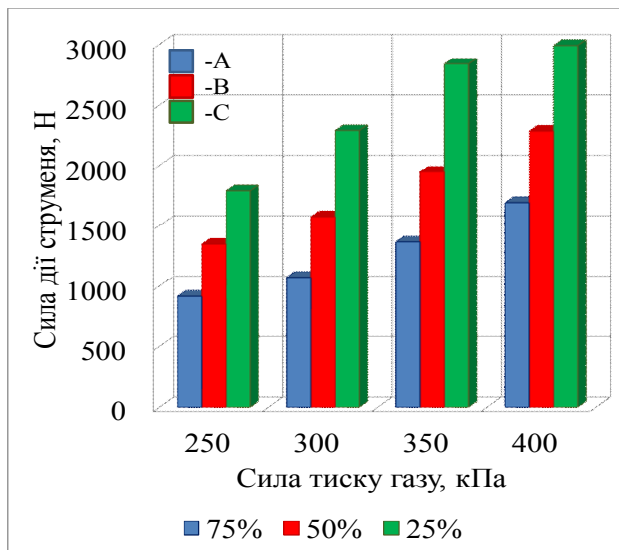


Рис. 1. Сила дії струменя, що витікає із сопел когерентного типу при частці периферійної частини А — 75 % Б, В — 50 % та С — 25 % при однаковому тиску на внутрішню та зовнішню частини сопел

газу, що подається на продувку, сприяє підвищенню сили дії струменя на рідину. При великих частках периферійної частини (75 та 50 %) збільшення тиску газу з 250 до 400 кПа у кожній із частин виражається у збільшенні приросту сили дії струменя (в середньому на 200 Н при частці периферійної частини 75 % та приблизно на 100 Н при 50 % частці зовнішньої частини сопла), а при частці периферійної частини 25 % навпаки цей показник знижується приблизно на 400 Н при збільшенні тиску з 250 до 400 кПа (при збільшенні загальної величини сили дії струменя на рідину у цьому варіанті при збільшенні тиску газу — рис. 1).

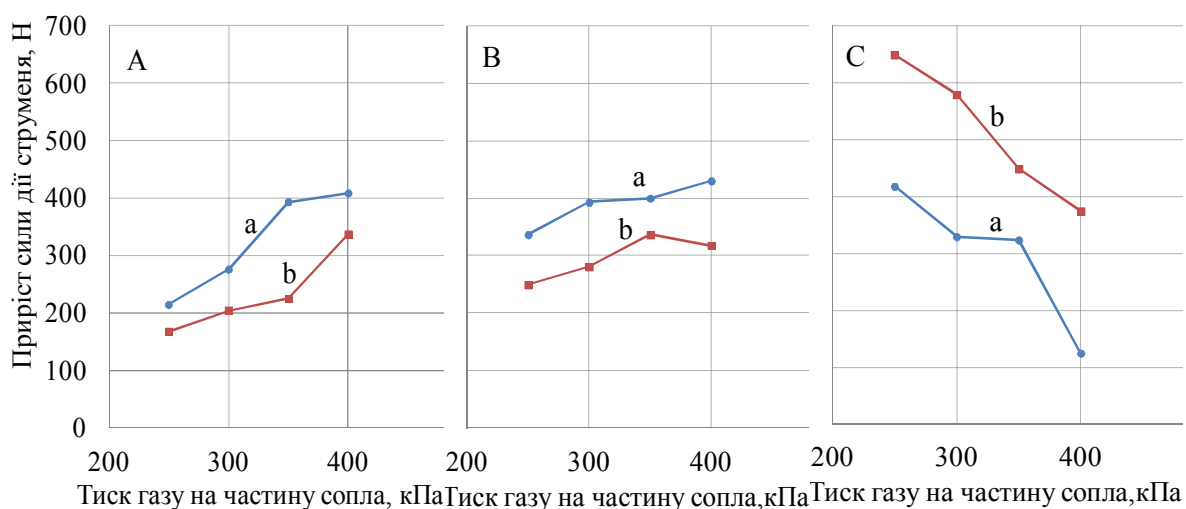


Рис. 2. Величина зміни сили дії струменя, що витікає з окремої частини сопла когерентного типу при постійному тискові на іншій частині при збільшенні тиску газу (а — при збільшенні тиску на центральну частину, b — при збільшенні тиску на периферійну частину) при частці периферійної частини А — 75 % Б, В — 50 % та С — 25 %

На першому етапі було досліджено особливості продувки крізь сопла когерентного типу з точки зору сили їх дії на рідину. Для аналізу були використані результати роботи сопел при тиску газу більше 250 кПа, задля забезпечення умов продувки із надзвучковими струменями (умови досягнення швидкості газового струменя 1,5—2 М). Для конструкції сопел із роздільною подачею газу на кожну частину було розраховано зміну сили дії струменю при збільшенні тиску на кожну окрему частину при постійному тискові на іншу частину сопла. Результати наведено на рис. 1—2. Перш за все слід відзначити, що при зменшенні частки периферійної частини у соплі когерентного типу змінюються особливості впливу струменя на рідину: зменшення частки периферійної частини у соплі при однаковому тиску

При цьому, у зазначеному варіанті величина зміни сили дії струменя (особливо, при тискові 250 кПа) була найвищою. Також було відзначено, що у соплах когерентного типу з великою часткою периферійної частини більш вагомою є дія центральної частини сопла, а для сопла з малою часткою периферійної частини (25 %) – на противагу, більший приріст сили дії при збільшенні тиску чиниться периферійною частиною, ніж центральною.

Також слід відзначити, що при порівнянні загального впливу на рідину струменів, що витікають з сопел когерентного типу, збільшення сили тиску продувного газу у 1,6 рази найбільше відбивається у дії сопел із більшою часткою периферійної частини (при 75 % у 1,83 рази та при 50 % у 1,69 проти 1,63 раз при частці периферії 25 % — рис. 1).

Співставлення особливостей продувки крізь сопло з роздільною подачею струменів до кожної із частин з продувкою крізь сопла із загальною подачею продувного газу і з продувкою крізь циліндричне сопло з діаметром, рівним діаметру центральної частини, показало (рис. 3), що різні газові підводи та сполучення під кутом, без яких не обійтись при під'єднанні, призводять до втрати сили струменя. Відмічено, що, як і на попередньому етапі досліджень, зростання величини тиску продувного газу та збільшення діаметру центральної частини (у разі циліндричного сопла — просто збільшенні діаметру сопла) призводить до збільшення сили дії струменя на рідину. Встановлено, що при великій частці периферійної частини (75 та 50 %, що відповідає діаметру центральної частини сопла  $1,6 \times 10^{-3}$  та  $2,4 \times 10^{-3}$  м відповідно) при швидкостях витікання газу, що наближені до промислових умов (тиск газу вище 250 кПа) сила дії струменя на рідину найбільша у варіанті використання сопла когерентного типу із загальним підведенням газу (на 33—74 % відн. у порівнянні з роботою циліндричного сопла при тиску 250—400 кПа відповідно). При малій частці периферійної частини (варіант С на рис. 3) всі досліджені варіанти сопел чинять вплив на близькому рівні з невеликим випередженням сопла із загальною подачею газу. При цьому для всіх досліджених варіантів співвідношення периферії до загальної площі сопла робота сопла когерентного типу з різними підводами до окремих частин характеризується силою впливу на рідину на рівні і навіть нижче продувки крізь циліндричне сопло із відповідним, рівним діаметру центрального сопла, розміром.

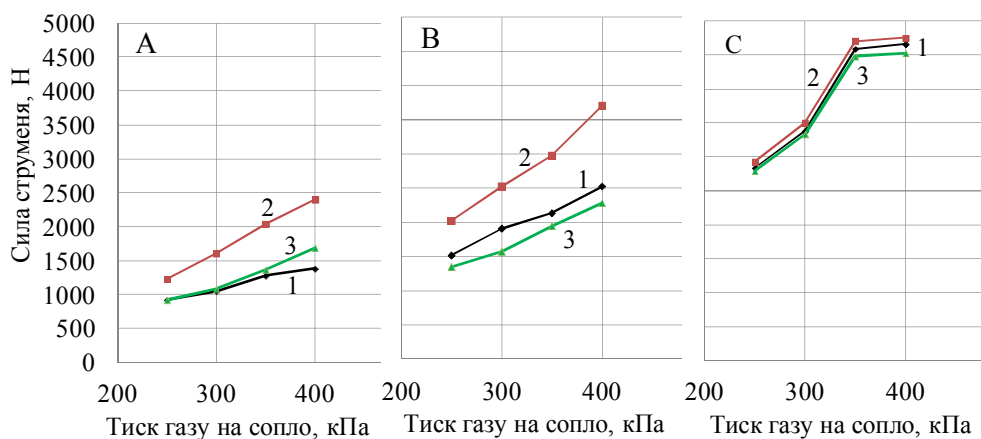


Рис. 3. Порівняння сили дії струменя, що витікає із сопел різної конструкції: 1 — циліндричне сопло, 2 — сопло когерентного типу із загальним підведенням газу, 3 — сопло когерентного типу із різним підведенням газу к частинам сопла при діаметрі центральної частини А —  $1,6 \times 10^{-3}$  м, В —  $2,4 \times 10^{-3}$  м та С —  $2,8 \times 10^{-3}$  м

### Висновки

Проведене дослідження за допомогою модифікованого манометра особливостей продувки крізь сопла когерентного типу (складаються із центрального каналу, що оточений щільним кільцевим зовнішнім) із різними конструкційними характеристиками за силою дії струменів, що з них витікають, на рідину дозволило встановити:

- за умов роздільного підведення продувального газу до сопел когерентного типу сила дії струменя менша, ніж за умов загального підведення газу до сопла, що пов'язано із втратами газу на підводах;

- використання сопел когерентного типу дозволяють збільшити величину сили дії струменя, що з них витікають, на рідину на величину від 33 до 74 % відносно у порівнянні із продувкою крізь відповідні циліндричні сопла при великих частках периферійної частини по відношенню до загальної площі сопла (більше 50 %);

- мала частка периферійної частини (порядку 25 %) практично не створює умов для покращення силових характеристик струменю;

- при великих частках периферійної частини (більше 50 %) основною діючою ланкою щодо сили впливу струменя на рідину є центральне сопло, а при малих – периферійна щільна частина.

Таким чином, за результатами встановлених висновків можливо рекомендувати використання сопел когерентного типу із загальним типом підведення продувального газу до сопла із великою (більше 50 %) часткою периферійної частини як сопел, наприклад, другого ряду, що чинять шлакоутворюючий вплив, сприяючи кращому проникненню у розплави у порівнянні із відповідними циліндричними та інтенсифікуватимуть процеси перемішування та формування шлаку у ванні.

### Список використаної літератури

1. Протопопов Е.В., Корвякова М.Н., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В. Разработка и оптимизация конструкции головок четырехсопловых кислородных фурм для большегрузных конвертеров, работающих в условиях передувания. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2013. № 4 (6). С. 3–7.
2. Optimized Scheme for Accelerating the Slagging Reaction and Slag–Metal–Gas Emulsification in a Basic Oxygen Furnace / Zichao Yin, Jianfei Lu, Lin Li, Tong Wang and others// *Appl. Sci.* - 2020. Vol. 10. P. 5101–5019.
3. Шибко А. В., Пицида В. И., Онацкий С. М. и др. Эволюция дутьевых устройств кислородного конвертера верхнего дутья. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 6. С. 7–9.
4. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. № 19. С. 36–41.
5. Величко А. Г., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Чернятевич И. В. Рациональные конструкции многосопловых наконечников для кислородно-конвертерных фурм. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 7. С. 49–52.
6. Modelling on the penetration depth of the coherent supersonic jet in EAF steelmaking/ G.S.Wei, R. Zhu, T. Cheng, K. Dong, R.Z. Liu// *Ironmak. Steelmak*. 2018. Vol. 45. P. 828–838.
7. Physical Modelling of Splashing Triggered by the Gas Jet of an Oxygen Lance in a Converter/ B. Zhang, K.Chen,R.F. Wang, C.J. Liu, M.F. Jiang // *Metals*. 2019. Vol. 9. P. 409.
8. Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels/ A.R.N.Meidani, M.Isac, A. Richardson// *ISIJ Int*. 2004. Vol. 44. P. 1639–1645.
9. Effect of shrouding Mach number and ambient temperature on the flow field of coherent jet with shrouding Laval nozzle structure/ Fuhai Liu, Dongbai Sun, Rong Zhu & Shaoyan Hu// *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2018. Vol. 58. iss. 12. P. 96–106.
10. Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process/ M.Alam, J. Naser, G. Brooks, et al.// *Metall. Mater. Trans. B*. 2010. Vol. 41. P. 1354–1367.
11. Numerical simulation of a supersonic oxygen lance for industrial application in EAFs/ E.Malfa, C.Giavani, F. Memoli, // *MPT Int*. 2005. Vol. 28. P. 44–50.
12. A mathematical model of an impinging air jet on a water surface/ M.Ersson, A. Tilliander, L.Jonsson// *ISIJ Int*. 2008. Vol. 48. P. 377–384.

13. Characteristics of the Supersonic Combustion Coherent Jet for Electric Arc Furnace Steelmaking / Fei Zhao, Rong Zhu and Wenrui Wang // *Materials*. 2019 . Vol.12. P. 3504–3518.
14. Investigation on coherent jet potential core length in an electric arc furnace/G.W. Tang, Y.Chen, A.K. Silaen // *Steel Res. Int.* 2018. Vol. 90. P. 1504–1516.
15. Мордасов М.М., Савенков А.П. Исследование силового воздействия струи газа на поверхность жидкости. *Журнал технической физики*. 2012. том 82. вып. 3. С. 37–45.

## STUDY OF THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF STREAMS EMERGING FROM COHERENT-TYPE NOZZLES

Golub T., Molchanov L., Semykin S., Vakulchuk V.

### Abstract

The main controlling factor in oxygen converting with top blowing is the stream of oxygen, which penetrate the metal bath and promotes the flow of heat, mass exchange and chemical processes. The inherent characteristics of the oxygen jet are created by the nozzle tip with nozzles that may differ in design depending on the issue they solve.

In the electrometallurgical industry, coherent nozzles consisting of a central nozzle for supplying the main oxygen jet and a surrounding annular nozzle for supplying shielding gas, mainly methane, are used to ensure deep penetration of the oxygen jet into the melt and to improve the mixing processes of the bath. This design of the nozzle, according to available published data, ensures the elongation of the main jet while preserving its momentum.

The paper presents the results of a study using a modified liquid manometer of the features of the action of jets flowing out of nozzles of a coherent type of different designs (the ratio of the outer and central parts of 25%, 50% and 75%) under blowing conditions that correspond to the conditions of top blowing during industrial oxygen conversion. The conducted research made it possible to establish that when the share of the peripheral part is more than 50%, the main controlling link of the jet is the central nozzle, and when the share is smaller, it is the peripheral slotted part. The jets flowing out of the nozzles of the coherent type with the share of the peripheral part more than 50% have a greater force of action on the liquid compared to the force of action of the corresponding central nozzle, by the amount from 33 to 74% relatively. The design of nozzles with a share of the peripheral part of the order of 25% practically does not create conditions for improving the power characteristics of the jet.

According to the results of the established conclusions, it is possible to recommend the use of nozzles of the coherent type with a share of the peripheral part of more than 50% as nozzles, for example, of the second row for top blowing lance, which have a slag-forming effect, contributing to better penetration into the melt compared to the corresponding cylindrical ones, that will intensify the processes of mixing and slag formation in the bath.

### References

- [1] Protopopov, Ye.V. Korvakova, M.N. Cherniatevich, A.G. Feiler, S.V. (2013) Razrabotka i optimizatsiia konstrukcii golovok chetyreh soplovykh kislorodnykh furn dlia bilshegruznykh konvertirov, rabotaushchih v usloviakh pereduva [Development and optimization of the design of heads of four-nozzle oxygen lances for heavy-duty converters operating under overblowing conditions]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta-Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 4 (6), (3–7) [in Russian].
- [2] Yin, Zichao. Lu, Jianfei. Li, Lin. Wang, Tong and others (2020) Optimized Scheme for Accelerating the Slagging Reaction and Slag–Metal–Gas Emulsification in a Basic Oxygen Furnace. *Application Science*, 10, (5101–5019).
- [3] Shibko, A. V. Pishchida, V.I. Onatskiy, S. M. and others (2012) Evolutsiia dutevykh ustroystv kislorodnogo konvertera verhnego dutia [Evolution of blast devices of the top-blown oxygen converter]. *Metallurgicheskaiagornorudnaiapromyshlennost - Metallurgical and mining industry*, 6, (7–9). [in Russian].

- [4] Sushenko, A.V. (2009) SoversensstvovaniieioptimizaciiadutevyhrezhimovIustroistvkislorodnyhkonverterov [Improvement and optimization of blast modes and oxygen converter devices]. *Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tehničnogo universytetu - Bulletin of the Azov State Technical University*, 19, (36–41). [in Russian].
- [5] Velichko, A.G. Cherniatevych, A. G. Sushenko, A.V. Cherniatevych, I.V. (2012) Racionalnye-konstrukciimnogoplovyhnaconechnikovdliakislorodnyhkonverternyhfirm [Rational designs of multi-nozzle tips for BOF lances].*Metallurgicheskaiagornorudnaiapromyshlennost - Metallurgical and mining industry*, 7,(49-52). [in Russian].
- [6] Wei, G.S.Zhu, R. Cheng, T. Dong, K. Liu,R.Z. (2018) Modelling on the penetration depth of the coherent supersonic jet in EAF steelmaking.*Ironmaking and Steelmaking*,45, (828–838)
- [7] Physical Modelling of Splashing Triggered by the Gas Jet of an Oxygen Lance in a Converter/B. Zhang,K.Chen,R.F. Wang, C.J. Liu, M.F. Jiang //Metals. 2019. Vol. 9. P. 409.
- [8] Meidani, A.R.N. Isac, M. Richardson, A. (2004) Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels. *ISIJ International*, 44, (1639–1645).
- [9] Liu, Fuhai Sun, Dongbai, Zhu, Rong & Hu, Shaoyan (2018) Effect of shrouding Mach number and ambient temperature on the flow field of coherent jet with shrouding Laval nozzle structure. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 58(12), (96-106).
- [10] Alam, M. Naser, J. Brooks, G. et al. (2010) Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process.*Metallurgical Material Transaction B*, 41, (1354–1367).
- [11] Malfa, E. Giavani, C. Memoli,F. (2005) Numerical simulation of a supersonic oxygen lance for industrial application in EAFs. *MPT International*, 28, (44–50).
- [12] Ersson, M. Tilliander, A. Jonsson,L. (2008) A mathematical model of an impinging air jet on a water surface. *ISIJ International*, 48, (377–384).
- [13] Zhao, Fei Zhu, Rong and Wang, Wenrui (2019) Characteristics of the Supersonic Combustion Coherent Jet for Electric Arc Furnace Steelmaking.*Materials*, 12, (3504–3518).
- [14] Tang, G.W. Chen, Y. Silaen,A.K. (2018) Investigation on coherent jet potential core length in an electric arc furnace. *Steel Research International*, 90, (1504–1516).
- [15] Mordasov, M.M. Savenkov, A.P. (2012) Issledovaniiesilovogovozdejstviiastruigazanapoverhnostzhidkosti [Investigation of the Force Effect of a Gas Jet on a Liquid Surface].*Zhurnal tehničeskoy fiziki - Journal of Technical Physics*, 82 (3), (37–45)[in Russian].