

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУВКИ КРІЗЬ ЩІЛИННЕ СОПЛО КОАКСІАЛЬНОГО ТИПУ

Голуб Т.С.¹ [ORCID], Молчанов Л.С.² [ORCID], Мінай О.М.³ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., ст.досл., Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., ст.досл., Україна

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, PhD, Україна,

³Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»,
PhD. Україна

Анотація. В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ послідовниками Семикіна С.І. продовжено дослідження щодо використання високовольтної електричної активізації кисневого потоку під час продувки у конвертерах з метою поліпшення фізико-хімічних процесів. Високовольтний електричний розряд генерується на виході спеціально розробленого коаксіального щілинного сопла. Отриманий профіль проточної частини сопла змінює гідро-газодинамічні параметри взаємодії газового струменя, що взаємодіє з навколишнім середовищем. Це й стало метою проведеного дослідження. За результатами проведеного низькотемпературного та чисельного (у середовищі ANSYS Fluent) дослідження особливостей процесу витікання газового струменя зі щілинного сопла та взаємодії сформованого потоку з рідкою ванною у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло еквівалентного діаметру. Встановлено, що властивості дослідного потоку створюються під впливом не тільки показників витрати чи тиску газу, а, перш за все, залежать від профіля проточної частини сопла, течія скрізь який формує відмінні від відомих (для циліндричного сопла) утворення на початку потоку, з більшими швидкостями. Це відповідає більш жорсткій продувці, відміченій за результатами низькотемпературного моделювання.

Ключові слова: верхня продувка, щілинне сопло, низькотемпературне моделювання, чисельне моделювання, гідро-газодинамічні процеси

В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ командою співробітників відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі під керівництвом с.н.с., к.т.н. Семикіна С.І. за декілька десятиліть був накопичений багатий лабораторний та промисловий досвід щодо дослідження та застосування нетрадиційних способів впливу на фізико-хімічні, технологічні

та екологічні показники, які супроводжують виплавку сталі на різних етапах переділу [1-3]. Серед останніх перспективних розробок займає особливе місце використання високовольтного електричного розряду для створення озону в кисневому потоці під час верхньої продувки у кисневих конвертерах [4]. Сьогодні традиції Семикіна С.І. продовжені його послідовниками щодо дослідження особливостей та природи впливу високовольтного електричного розряду на газові потоки під час продувки металевих розплавів, розуміння механізму дії та причин отриманих позитивних результатів.

Розроблений Семикіним С.І. та досліджений разом із співробітниками спосіб високовольтної активізації під час кисневого конвертування був заснований на формуванні іскрового розряду на виході з продувального сопла верхньої кисневої фурми. Відповідно до цього була створена спеціальна конструкція сопла – щілинне коаксіальне сопло. Такий тип сопла докорінно відрізняється від тих, що повсякчас використовують у практиці кисневого конвертування. Фізичні високотемпературні дослідження його використання, проведені на базі лабораторії кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова Дніпровського державного технологічного університету, вказали на такі особливості використання щілинного сопла: «запалювання» продувки відбувалося раніше на 5 – 10 хвилин, температура підфурменої зони вища на 300 – 400 °С, активне засвоєння добавок вапна [5]. Було зроблено припущення, що ключовим фактором отримання вказаних відмінностей є особливість взаємодії газового потоку, який формується щілинним коаксіальним типом сопла, з рідкою ванно. Відповідно метою даної роботи стало дослідження природи взаємодії газового струменя, який витікає з щілинного коаксіального сопла, з газовою та рідкою фазами.

Щілинне коаксіальне сопло, яке використовувалося для дослідної продувки з активізацією, було одиничним вертикально спрямованим кільцевим соплом. Тому для аналізу та адекватного порівняння було обрано одиничне циліндричне сопло еквівалентного щілинному діаметру. Для дослідження було виготовлене щілинне коаксіальне сопло з діаметрами зовнішнім та внутрішнім $3,6 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, та циліндричне з діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м

(фактично еквівалентний діаметр відповідав масштабу 1:13 до еквівалентного перетину промислового варіанту сопел верхньої кисневої фурми, яка використовується для продувки у 250-т конвертері). Дослідження було проведено на низькотемпературній моделі з використанням підфарбованої води (6 л) та стисненого повітря у якості модельних середовищ та засобами чисельного моделювання. Продувку здійснювали з різною витратою повітря від компресора (0,5 – 5,0 м³/год) та за різного положення фурми відносно поверхні рідини: 20 – 60 калібрів. Хід продувки записували на відеокамеру з наступним аналізом кадрів. Для умов низькотемпературного моделювання основними критеріями подоби були критерій Фруда модифікований та критерій Вебера (останній був доданий через досить малий розмір щілини дослідного сопла із відповідним важливим впливом поверхневого натягу). Чисельне моделювання проведено за допомогою програми ANSYS Fluent з алгоритмом рішення, який базується на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса та, відповідно, використовує модель Volume of Fluid із застосуванням двокомпонентного рівняння $k-\epsilon$ зі стандартною функцією стінки для опису турбулентності [6]. Тиск дослідження 200 до 600 кПа. Валідація результатів чисельного моделювання здійснювалася за допомогою результатів виміру швидкостей газового потоку вздовж осі струменя з використанням мікротрубки Піто й показала високий рівень відповідності [7].

Аналіз результатів дослідження на низькотемпературній моделі показав, що під час продувки на поверхні рідини формувалася кратер який заглиблювався зі зростанням витрати продувального газу із формуванням сплесків, які відривалися з кромки кратеру, у міру заглиблення струменя. Причому відзначено, що продувка крізь щілинне коаксіальне сопло характеризувалася більшою жорсткістю ніж продувка крізь циліндричне сопло, що проявлялося у переході до режиму заглибленого струменя із формуванням сплесків з кромки кратеру при менших витратах продувального газу у порівнянні із продувкою крізь циліндричне сопло. Такі особливості продувки крізь щілинне сопло проявилися при всіх досліджених положеннях фурми, з найбільш характерним проявом при положенні фурми 40 калібрів відносно

початкового рівня рідини. Для прикладу на рис. 1 наведено характерні фото продувки крізь обидва типи сопла за різних витрат за умов положення продувної фурми на висоті 40 калібрів. Відповідно, зміна профілю проточної частини сопла з циліндричного на щілинне при збереженні загального прохідного перетину значно впливає на умови формування потоку та його швидкісні й силові характеристики, які детально були досліджені за допомогою чисельного моделювання.

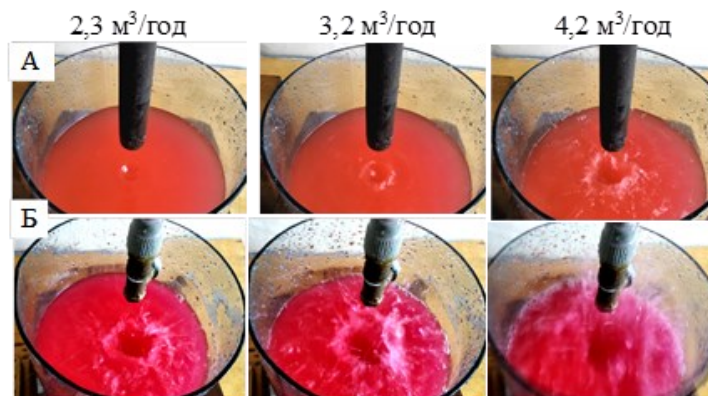


Рисунок 1 – Порівняння результатів низькотемпературного дослідження продувки рідини крізь щілинне (А) та циліндричне (Б) сопла за різних витрат продувного газу (зазначено зверху)

Результати чисельного дослідження дозволили виявити особливості формування топології газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного сопла за різних умов тиску продувного газу. На рис. 2 у якості прикладу наведено результати у вигляді нефограм швидкості газового потоку для умов продувки з тиском 300 кПа. Перш за все звертає увагу особливість формування дисків Маха за умов продувки крізь щілинне сопло: на початковій ділянці струменя до 10 калібрів потік продовжував зберігати кільцеву форму з відповідним утворенням кільцевих дисків Маха (на рис. 2 представлений повздовжній переріз струменя, на якому кільцеві утворення виглядають як окремі бочкоподібні утворення для двох потоків). Зазначена особливість є суттєвою відмінністю у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло із формуванням суцільних бочкоподібних утворень у ядрі потоку. Надалі за довжиною струменя потік газу зі щілинного сопла зливався у суцільний із формуванням єдиного ядра потоку у центральній частині із підвищеними показниками швидкостей потоку. Також слід відзначити, що за однакового

тиску продувного газу величина швидкості газового потоку у наявних кільцевих чи бочкоподібних утвореннях на початковій ділянці струменя за умов продувки крізь сопло щілинної конструкції була вищою на 15 – 20 % відн. в залежності від дослідженого початкового тиску. Більш високі показники газового струменя, який витікав з сопла щілинної конструкції, зберігалися й далі за довжиною: на відстані 20 калібрів – на 10 – 17% відн. й на відстані 40 калібрів – на 19 – 29% відн. Відповідно на відстані від зрізу сопла, яка відповідала робочій висоті розміщення продувної фурми, газовий струмінь, що витікав з коаксіального щілинного сопла, мав вищі показники імпульсу, що відображалось у відміченій більшій жорсткості взаємодії з рідкою ванною та глибшому зануренні струменя у порівнянні зі струменем, що витікав з циліндричного сопла. При цьому ширина газового струменя, що витікав з дослідних сопел, на ділянці до 20 калібрів мала близькі значення. На подальшому дослідженому проміжку потоку ширина струменя, який витікав зі щілинного сопла, була більшою на 20 – 25 % в залежності від тиску газу, що продувався.

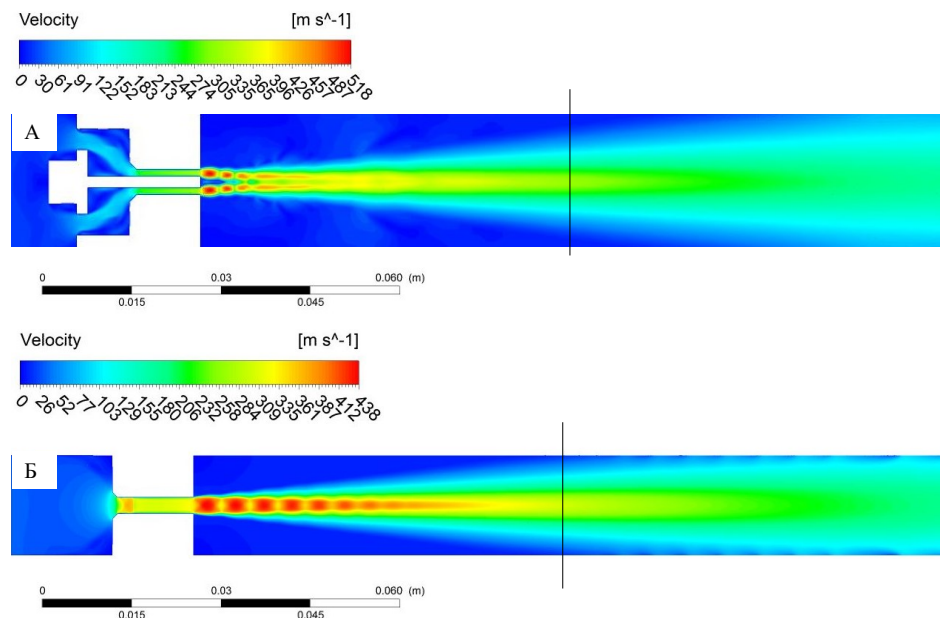


Рисунок 2 – Порівняння нефограм швидкості газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного (А) та циліндричного (Б) сопел при тиску газу 300 кПа.
Лінією відзначено відстань 20 калібрів, загальна довжина струменя 40 калібрів

Висновки

Відповідно за результатами фізичного низькотемпературного та чисельного моделювання були встановлені особливості природи формування газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного сопла, та гідродинамічні особливості їх взаємодії з рідкою фазою у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло. Відзначено важливу роль профілю продувального сопла над загальним перетином у формуванні швидкісних показників струменя.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Semykin S.I., Poliakov V.F., Dudchenko S.A., Golub T.S., Vakulchuk V.V., Semykina Ye.V. Eksperimentalnye issledovaniya v laboratornyh usloviyah ISI NASU effektivnosti vliyania elektricheskikh vozdeistvij na rasplav chuguna pri ego vnepechnom rafinirovanii granulirovannym magniem. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2013. Iss. 27. P. 111–116. [in Russian]
2. Semykin S.I., Golub T.S. In Situ Investigation of Slag-Metal Interactions in Top Blown Oxygen Converter upon Low-Voltage Application. *JOM*. 2018, Vol. 70(10). P. 2262–2269. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3073-z>
3. Semykin S.I., Poliakov V.F., Semykina Ye.V., Kiiashko T.S., Semykina A.S. Sopotavlenie effektivnosti rafinirovaniya metalla v konvertere I stalerazlivochnom kovshe pri nalozhenii elektricheskogo potentsiala. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2009. Iss. 19. P. 134–139. [in Russian]
4. Semykin S.I., Golub T.S., Molchanov L.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. *Energotekhnologii I Resursosberezhenie*. 2025. Vol. 83(2). P. 107–116 <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
5. Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostej produvki metallicheskoj vanny v LD konvertere cherez koltsevoe koaksialnoe soplo. *Metal and Casting of Ukraine*. 2019. №27(7-9). P. 27-32. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.027>. [in Russian]
6. Lorstad D., Fuchs L. High-order surface tension VOF-model for 3D bubble flows with high density ratio. *J. Comput. Phys.* 2004. Vol. 200 (1). P. 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.04.001>
7. Mironov S.G., Aniskin V.M., Korotaeva T.A., Tsyryulnikov I.S. Effect of the Pitot tube on measurements in supersonic axisymmetric underexpanded microjets. *Micromachines*. 2019. Vol. 10(4). Art. 235. <https://doi.org/10.3390/mi10040235>

**RESEARCH OF GAS-HYDRODYNAMIC FEATURES OF BLOWING THROUGH A
COAXIAL-TYPE SLOT NOZZLE**

T.S. Golub, L.S. Molchanov, O.M. Minai

Abstract. *At the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NASU, the followers of S.I. Semykin continued their research on the use of high-voltage electrical activation of the oxygen flow during blowing in converters in order to improve physicochemical processes. A high-voltage discharge is formed at the output of a coaxial slot nozzle, which affects the hydro-gas dynamic indicators of the gas – environment interaction. This was the purpose of the research. According to the results of a low-temperature and numerical study (in the ANSYS Fluent) it was established that the properties of the experimental flow are formed under the influence, first of all, of the design with the formation of not typical flow shape at the beginning of the flow, different from those known for a cylindrical nozzle, with higher velocities. This corresponds to the more rigid blowing noted according to the results of low-temperature modeling.*

Keywords: *top blowing, slot nozzle, low-temperature modeling, numerical modeling, hydro-gas dynamic processes*