

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.07

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

Т.С. Голуб, Л.С. Молчанов, О.М. Мінай

**КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ
СТРУМЕНІВ, ЩО ВИТІКАЮТЬ З СОПЕЛ ЦИЛІНДРИЧНОЇ
КОНСТРУКЦІЇ, ДЛЯ УМОВ ВИКОРИСТАННЯ
В КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРАХ**

Анотація. Киснево-конверторний процес є єдиним конкурентоспроможним лідером з виробництва рідкої сталі. Це, насамперед, зумовлено наявними різними типами продувних пристроїв, які виконують за ходом виплавки різноманітні функції та дають змогу оперативно підлаштовуватися під змінні технологічні умови. Основними типами сопел для верхніх продувних пристроїв є сопла Лавалю, які використовуються для подачі основного кисневого потоку, та циліндричні сопла, які частіше використовують для допалювання відхідних газів. Представлені результати різнопланового дослідження особливостей витікання газового струменя з циліндричного сопла, які були проведені методами тінькової зйомки при витіканні газового потоку у вільне повітряне середовище та у модельну рідину – воду, та методами математичного моделювання для з'ясування раціональних меж їх використання у конструкції верхніх продувних фурм кисневого конвертера. За результатами досліджень відповідно до промислових технологічних умов використання сопел, встановлено, що при висоті розташування циліндричних сопел на рівні 40 калібрів від поверхні спокійної ванни високі показники енергії продувного газу та відповідно швидкостей газового потоку можуть бути досягнуті при подачі продувного газу з надлишковим тиском не менше 300 кПа. При цьому можливість проникнення у реальний шлако-металевий розплав за таких умов (при екстраполяції розрахунків на 60 кг лабораторну модель кисневого конвертера) складає на рівні 56 – 65 % висоти шлакового розплаву. Відмічено, що для збільшення проникної здатності газового струменя, що витікає з циліндричного сопла, необхідно зменшити висоту розміщення продувного пристрою на 25% відн.

Відзначені характерні особливості зміни форми газового струменя та розповсюдження швидкостей за довжиною при зміні тиску продувного газу, та їх

вплив на фактичну глибину занурення газового струменя у модельну рідину - воду. Зроблений висновок про доцільність використання циліндричних сопел як сопел другого ряду для багаторядних верхніх фурм.

Ключові слова: *продувка зверху, циліндричне сопло, газовий струмінь, тіньова зйомка, математичне моделювання, глибина занурення.*

Постановка проблеми. З практики сучасного киснево-конвертерного процесу відомо, що циліндричні сопла використовуються для організації ділянок внутрішнього простору конвертера, які відрізняються звуковою швидкістю руху газових потоків й використовуються для оптимізації теплового балансу плавки та поліпшення умов шлакоутворення. З досвіду киснево-конвертерного процесу відомо, що в період становлення використовувалися фурми, оснащені циліндричними соплами. Відомо, що виготовлення наконечників кисневих фурм, оснащених соплами Лавалю, супроводжується необхідністю використання складного технологічного устаткування. А експлуатація зазначеного типу сопел в умовах високотемпературної металевої ванни обмежена зміною конфігурації профілю кромки сопла через її розгар. Таким чином актуальним завданням для сучасного киснево-конвертерного процесу є встановлення меж використання сопел циліндричного типу у конструкції верхньої кисневої фурми.

Аналіз досліджень. Киснево-конвертерний спосіб отримання залізо-вуглецевого напівпродукту залишається єдиним найбільш конкурентоспроможним способом, який забезпечує близько 71 % виробництва [1, 2]. Це зумовлено як гнучкістю самого процесу, який легко пристосовується до шихтових умов, так і меншими порівняно з іншими варіантами виробництва рідкої сталі витратами [2]. Гнучкість киснево-конвертерного процесу зумовлена наявними різновидами процесу, і, в першу чергу, значними керуючими можливостями верхнього продувного пристрою – кисневої фурми [3-6]. В сучасних умовах для забезпечення ефективного керуючого впливу верхньої продувної фурми на фізико-хімічні процеси, що протікають в порожнині кисневого конвертера, в конструкції фурми використовують різні сопла: типу Лавалю для введення основного кисневого потоку для здійснення процесів окислення; сопла циліндричного типу, розташовані як на

наконечнику, так і на певній відстані від нього – на другому ярусі. Вони призначені для здійснення додаткового впливу на процес конвертування за рахунок поліпшення теплового балансу плавки за рахунок допалення CO до CO₂ у відхідних газах; покращення масообмінних процесів для асиміляції шлакоутворюючих матеріалів та ефективного впливу на процеси рафінування за рахунок газодинамічного впливу на шлако-металеву емульсію.

Мета дослідження. Враховуючи використання сопел циліндричного типу у верхніх продувних фурмах, що використовуються у плавильних печах відбивного типу, метою дослідження є встановлення газодинамічних особливостей витікання газових струменів з циліндричних сопел для з’ясування раціональних меж їх використання у конструкції верхніх продувних фурм кисневого конвертера.

Прилади та обладнання. Дослідження технологічних можливостей циліндричних сопел було проведено за допомогою фізичного стендового дослідження з продувкою у повітряне середовище та у модельне водне середовище, а також за допомогою математичного моделювання на прикладі циліндричного сопла діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м (у масштабі 1:13 до промислового еквівалентного перетину сопел верхньої кисневої фурми, що використовується для продувки в 250-т кисневих конвертерах) при продуванні стисненим повітрям за контролюємої витрати (тиску). Стендове дослідження було проведено з використанням методів тіньової зйомки [7, 8]. На рис. 1 наведено загальний вигляд стенду дослідження тіньовою фотозйомкою витікання газового струменя у повітряне середовище [7]. На рис. 2 наведений загальний вигляд стенду дослідження взаємодії газового струменя з рідиною за допомогою тіньової фото/відеозйомки. Для моделювання взаємодії газового струменя з рідкою ванною була обрано у якості модельної рідини вода, яка має близькі значення в’язкості у порівнянні із рідкою сталлю й фізичні параметри якої добре узгоджуються відповідно до критеріїв подоби Фруда модифікованого [9, 10]. При проведенні стендової тіньової зйомки взаємодії газового струменя з рідкою фазою використовували пласку прозору скляну ємність. Такий вибір був обґрунтований проведеними додатковими дослідженнями щодо впливу типу ємності на лінійні розміри об’єктів та їх

співвідношення на отриманих фотографіях, за якими було встановлено, що пласка поверхня створює менше викривлення середовища, ніж опукла. Продувку здійснювали стисненим повітрям з тиском 100, 200 та 300 кПа (до показників тиску, що приймається за робочий перед соплами промислових верхніх продувних пристроїв [11]), що подавався від компресора крізь циліндричне сопло $3,2 \cdot 10^{-3}$ м. Висоту розміщення продувної фурми відносно спокійної рідини встановлювали на рівні 20 – 40 калібрів продувного сопла.

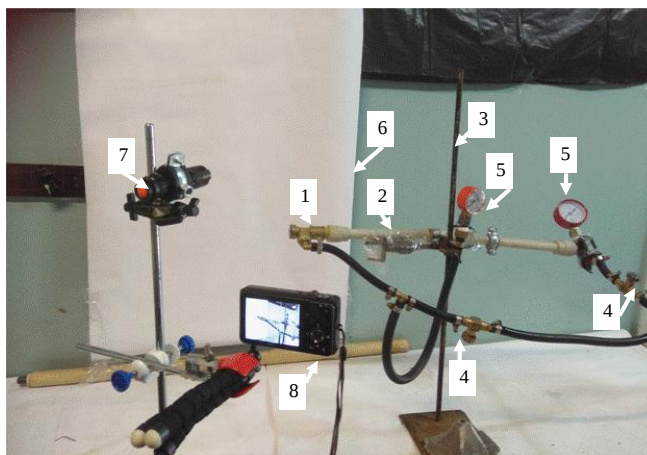


Рисунок 1 – Фото установки для тіньової зйомки витікання газового струменя з дослідного сопла. 1 – дослідний наконечник з соплом, 2 – фурма, 3 – кронштейн, 4 – голчастий кран, 5 – манометр, 6 – білий екран, 7 – джерело світла, 8 – камера.

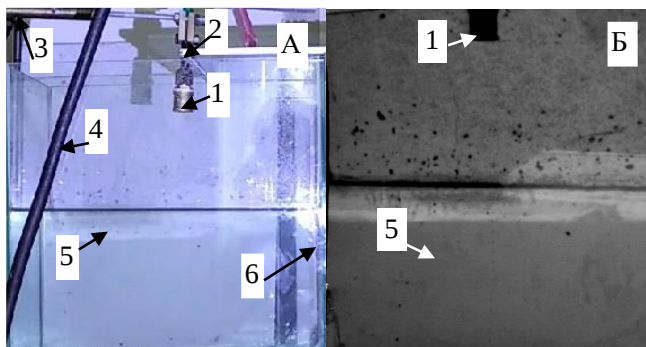


Рисунок 2 – Фото установки тіньової зйомки взаємодії газового струменя, що витікає з дослідного сопла, з рідкою ванною, змодельованою водою (А), та вигляд тіньової фотографії (Б) 1 – дослідний наконечник з соплом, 2 – продувна фурма, 3 – кронштейн, 4 – шланг подачі стисненого повітря на продувку, 5 – модельна рідина – вода, 6 – прозора пласка ємність

Область занурення газового струменя у рідину фіксували на білому екрані, розташованому позаду моделі. Геометричні параметри лунки занурення переобчислювали на реальні виходячи з дійсних геометричних розмірів продувного пристрою, що фіксувався також на фото, та з урахуванням кута нахилу відеокамери, яка була розташована для реєстрації глибини лунки занурення зі зміщенням вправо від центральної вісі продувного пристрою [8].

Математичне моделювання було проведено за допомогою програмного продукту ANSYS Fluent, який призначений для вирішення задач обчислювальної газо- та гідродинаміки (CFD). Для моделювання був обраний алгоритм рішення, що базується на густині. Він застосовується для розрахунків високошвидкісних транс- та надзвукових потоків. Поведінка газового струменя, що витікає з сопла, можна описати рівнянням нерозривності, яке зв'язує швидкість потоку з площиною перетину вихідного каналу, яке у диференційному вигляді за осьовим направленням має вигляд [12-13]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dx} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dx} = 0 \quad (1)$$

де ρ – густина газу, кг/м^3 ; V – швидкість потоку, м/с ; S – площа вихідного перетину сопла, м^2 .

Для створення умов витікання струменя з надзвуковою швидкістю, співвідношення тиску, що є на вході в сопло, та навколишнього тиску має задовольняти рівнянню:

$$\frac{P_0}{P_3} \geq \frac{(\gamma + 1)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}{2} \geq 1,89 \quad (2)$$

де P_0 – тиск газу на вході в сопло, Па ; P_3 – зовнішній тиск, Па ; γ – показник адіабати (для двоатомного газу – кисню та повітря, дорівнює 1,4).

За вказаних умов формується струмінь, що рухається з надзвуковою швидкістю, й при взаємодії із навколишнім середовищем утворює ударні хвилі, в яких середовище струменя згущується з формуванням бочкоподібних утворень й дисків Маха [12-14].

Алгоритм обчислення математичної моделі базувався на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса із дискретизацією основних рівнянь у вигляді

неусталеного рівняння збереження енергії для перенесення скалярних величин, турбулентної в'язкості та теплопровідності [15]. Для нестискаємого газового середовища система рівнянь мала вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0, \\ \rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{v}) + \bar{f}, \\ dp = K \frac{d\rho}{\rho}. \end{cases} \quad (3)$$

де Δ – оператор Лапласа; $\bar{v}$ – кінематична в'язкість, м²/с; μ – динамічна в'язкість, кг/м·с; ρ – густина середовища, кг/м³; p – тиск, Па; $\bar{f}$ – об'ємна сила (наприклад, сила тяжіння).

Основними кроками проведення математичного моделювання були:

1. побудова геометрії розрахункової моделі;
2. побудова розрахункової сітки;
3. налаштування математичної моделі (визначення фізичних властивостей матеріалів, завдання граничних умов, налаштування параметрів вирішення, ініціалізація початкових значень змінних, завдання частоти збереження проміжних результатів, вибір кроку часу розрахунку);
4. комп'ютерне обчислення;
5. обробка отриманих результатів.

Для математичного моделювання витікання газового потоку крізь циліндричне сопло була побудована 3D модель циліндричного сопла (рис. 3).

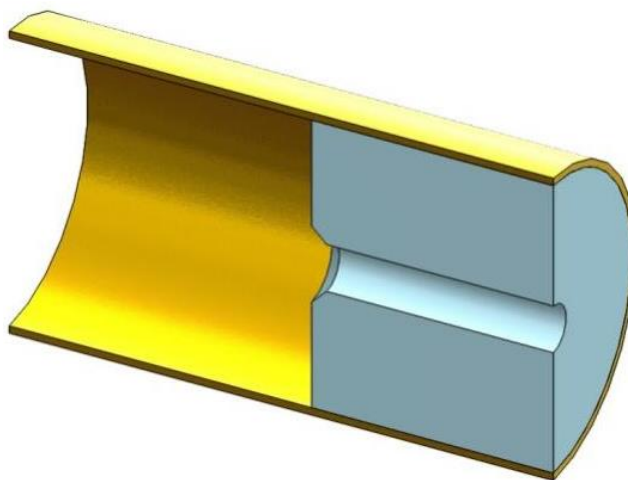


Рисунок 3 – 3D модель циліндричного сопла у перетині

Модельним тілом було обрано повітря, властивості якого задавалися рівнянням стану ідеального газу Клапейрона-Менделєєва [16]. Для отримання точних рішень була використана дискретизація рівнянь потоку, кінетичної енергії в турбулентному потоці, розсіювання турбулентного потоку другого та вище порядків точності. Результати моделювання були отримані у вигляді кольорових полів швидкостей та тиску продувного газу за довжиною струменя.

Результати та дискусія. На рис. 4 для прикладу наведено результати обчислення полів швидкостей у газовому струмені, що розповсюджується у повітряне середовище за стандартних умов при надлишковому тиску продувки 100 – 300 кПа. За отриманими результатами було встановлено, що при витіканні з циліндричного сопла у газовому струмені під дією зміни навколишнього тиску формується ущільнена центральна частина – «ядро», де швидкості газу набувають на початковій ділянці надзвукових значень (помаранчевий та червоний колір на рисунку 4). Відмічено, що при надлишковому тиску продувки 200 кПа і вище на початковій ділянці газового струменя формуються періодично повторювані опуклі ущільнення й розрядження – так звані «бочки чи диски Маха». Це свідчить про достатньо високу енергію, яку несе із собою струмінь. Це підтверджується розрахунками: для надлишкового тиску 200 кПа у «ядрі» енергія струменя сягає до 235 кДж, а для 300 кПа – до 244 кДж. Порівняння довжини «ядра» струменя вказує на те, що зі зростанням продувного тиску з 100 кПа до 200 кПа надлишкових довжина «ядра» збільшується на 21,8 % відн. Але в подальшому, із перерозподілом енергії на утворення дисків Маха, при збільшенні продувного тиску до 300 кПа довжина ядра збільшується тільки на 4,5 % відн. у порівнянні із продувкою з тиском 200 кПа.

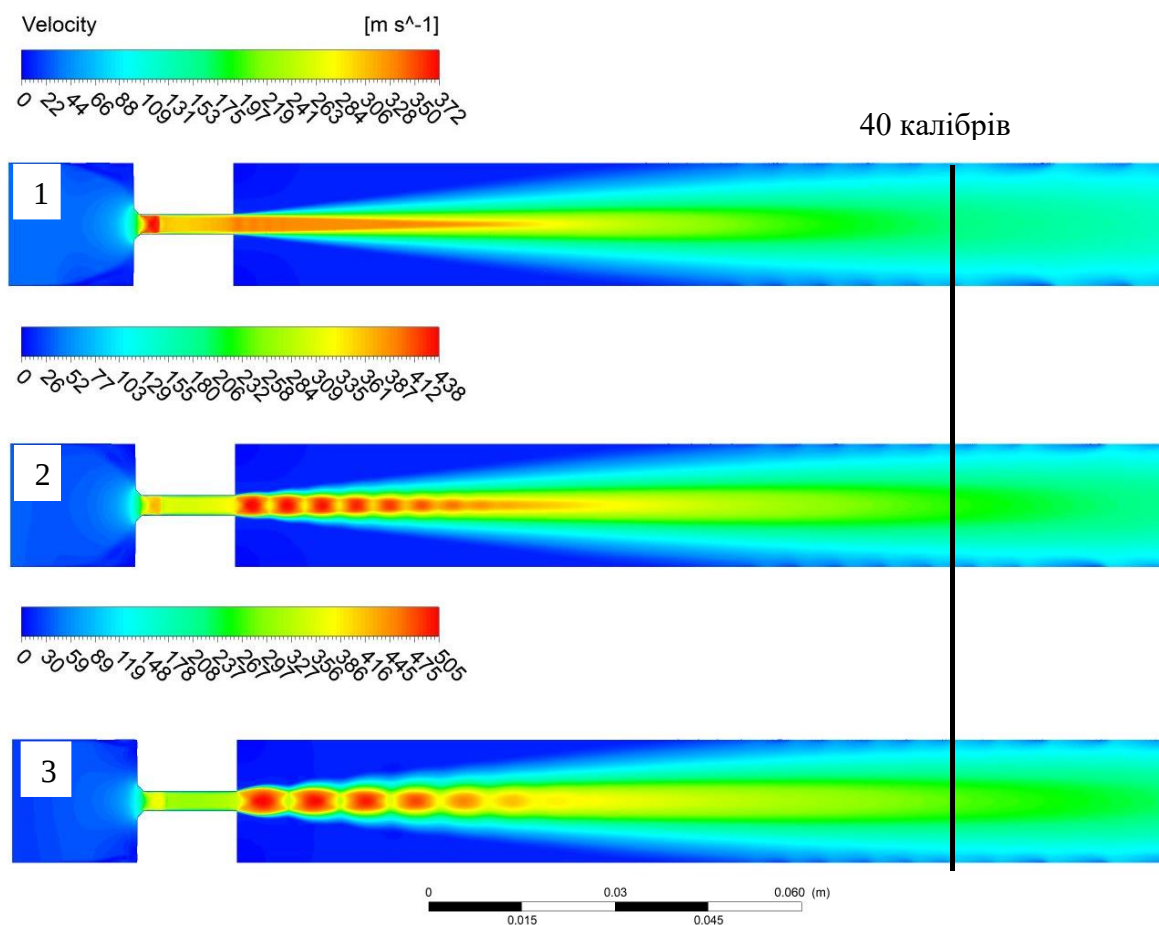


Рисунок 4 – Кольорові поля розповсюдження швидкостей у газовому потоці при витіканні з циліндричного сопла з надлишковим тиском:
1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

На рисунку 4 відмічено відстань за довжиною струменя, що відповідає робочій відстані для продувки реальної ванни – 40 калібрів. Відповідно можна зробити висновок, що на робочій відстані газовий струмінь може чинити необхідний динамічний вплив за умов продувки із тиском вище 300 кПа (за цих умов можна очікувати досягнення газового потоку поверхні ванни із швидкостями на рівні звукових - швидкість звуку 330 м/с у повітрі).

Для оцінки отриманих результатів математичного моделювання було проведено натурне дослідження продувки крізь циліндричне модельне сопло методом тіньової зйомки при розповсюдженні у повітряне середовище. Ключовими моментами тіньової зйомки були: забезпечення лінійності світлового потоку від джерела світла; забезпечення перпендикулярності

джерела світла та газового струменя й екрану. Експериментальні фотознімки були перш за все порівняні з кольоровими полями швидкостей, розрахованих за однакових умов. На рис. 5, як приклад, наведено порівняння для умов надлишкового тиску 300 кПа. На результаті моделювання та фотозйомки вихідний переріз сопла у наведеному форматі рисунку є однаковим для забезпечення адекватної можливості порівняння.

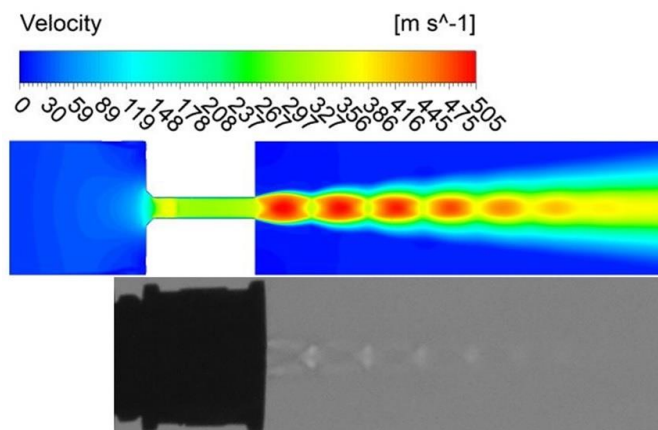


Рисунок 5 – Порівняння результатів математичного моделювання та тіньової зйомки витікання газового струменя крізь циліндричне сопло за тиску продувного газу 300 кПа

Фотознімки мають схожі з результатами математичного моделювання особливості зміни полів швидкостей за довжиною струменя з утворенням «бочкоподібних» структур – дисків Маха, з ділянками ущільнень й розріджень середовища, які на фотознімках проявляються в згущенні або висвітленні інтенсивності кольору. Можна сказати, що результати математичного моделювання більш інформативні. За їх допомогою можна краще оцінити особливості розповсюдження газового струменя з моменту витікання з сопла і далі вздовж струменя. Видно, що саме в центрі кожного «бочкоподібного» утворення швидкість струменя набуває максимального значення. Також видно, що надалі, за областю утворення «бочкоподібних» структур, струмінь дещо розширюється у порівнянні з вихідним перетином (приблизно на 15 – 20 %), зберігаючи достатньо високі значення швидкості (вище звукової швидкості 330 м/с для повітря).

Також слід відзначити, що на рисунках співпадають довжини утворених відповідних за довжиною струменя «бочок»: для першої – 0,012 м,

другої – 0,014 м, третьої 0,013 м, четвертої – 0,012 м (далі за наявних умов зйомки на фото «бочкоподібні» утворення немає можливості точно оцінити). Дещо відрізняється висота «бочкоподібних» утворень за фото від математично отриманих приблизно на 1 мм, що, ймовірно, пов'язано з точністю фотозйомки.

Відповідно до методики оцінювання швидкості газового потоку за тінювими фото, за якої швидкість газового потоку перед ударною хвилею визначається за кутом нахилу дотичної стрибка ущільнення [8], були визначені швидкості за першими трьома «бочкоподібними» утвореннями й отримані результати були співставлені з результатами обчислення швидкості методом математичного моделювання. На рис. 6, А наведено співставлення для умов продувки з надлишковим тиском 300 кПа. Було відзначено, що результати математичного моделювання та ті, що були отримані за тінювими фото, відрізняються на величину порядку 1,6 – 5,5 %. Це дає змогу зробити висновок про адекватність отриманих результатів шляхом математичного моделювання. Слід відзначити, що точність методу визначення швидкості за тінювою зйомкою, як і будь-який метод, у якому бере участь людина, залежить від точності побудови прямих та визначення їх координат перетину осей для встановлення кутів нахилу.

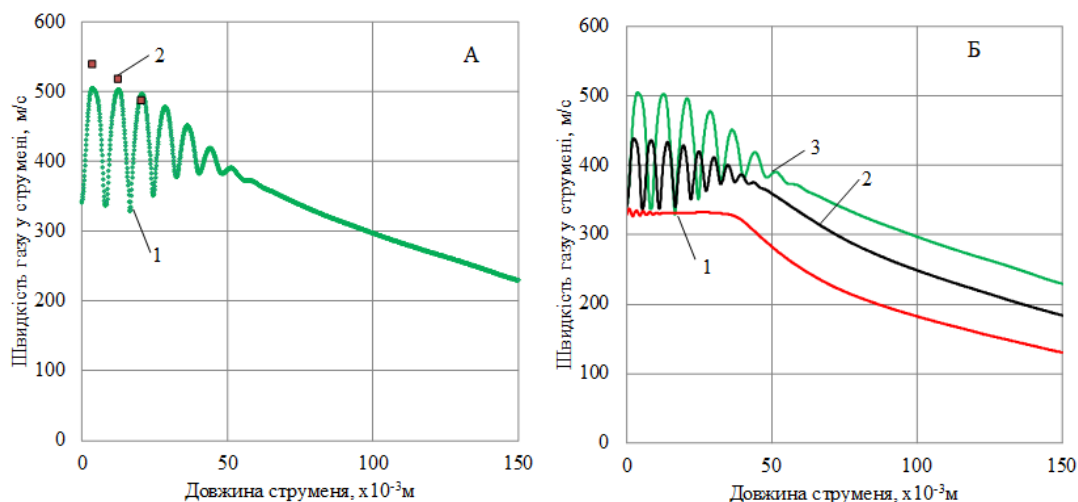


Рисунок 6 – Співставлення результатів (А) математичного обчислення (1) швидкості за горизонтальною віссю струменя та швидкостей, оцінених за тінювими фото (2) та співставлення швидкостей витікання газового струменя за довжиною при різному надлишковому тиску продувочного газу (Б): 1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

Однак, для даного випадку пряме вимірювання не надасть точніших результатів, бо діаметр модельного сопла близький до робочого діаметру отворів стандартних трубок Піто. Крім того наявною є перевага математичного моделювання, яке дозволяє отримати не тільки у окремих точках дані швидкостей газового струменя, але й дізнатися як і з яким характером швидкість змінюється за довжиною струменя. Ці дані дають додаткову корисну інформацію для розуміння поведінки як окремо газових потоків, так і на наступному етапі – у взаємодії із рідкою ванною.

Наступним кроком дослідження було проведення співставлення чисельних результатів розрахунку швидкостей газових струменів за довжиною струменя при різних надлишкових тисках витікання продувного газу: 100, 200 та 300 кПа (рис.6, Б). Відмічено, що характер зміни за довжиною струменя отриманих розрахункових результатів кореспондується з наявними в літературі даними щодо зміни швидкості газового струменя, який витікає з продувних пристроїв за умов електродугової плавки, що є додатковим підтвердженням адекватності розрахункових моделей [17].

Встановлено, що після виходу з продувного сопла за довжиною струменя швидкість продувного газу спочатку має пульсуючий характер із середнім приблизно сталим показником до довжини струменя приблизно $36 - 40 \cdot 10^{-3}$ м, а далі починає знижуватися (рис. 6, Б). Відмічено, що зі збільшенням надлишкового тиску продувного газу з 100 кПа до 300 кПа швидкість газового струменя на початковому етапі, де присутні коливання, збільшується на 29,5 %, а на ділянці спаду - на 62,6 %. При цьому амплітуда коливань швидкості газового потоку на виході збільшується у 21 раз і довжина струменя, впродовж якої присутні коливання, більша у 4,2 рази. Кількість відмічених максимумів швидкості газового струменя при продуванні з надлишковим тиском 200 – 300 кПа була встановлена на рівні 8 із максимальними показниками швидкості при 200 кПа перші п'ять – 435 – 416 м/с, а при 300 кПа – 505 – 451 м/с. Ці величини перевищують звукову швидкість на 31,8 – 26,1 % та 53,0 – 36,6 % відповідно. При продуванні із надлишковим тиском 100 кПа швидкість продувного газу знаходиться на рівні звукової, однак зафіксувати візуально згущення середовища на тінювих фотографіях за

цих умов не вдалося. Вказані швидкості відповідають початковій ділянці струменя. Вподальшому швидкість струменя знижується і на відстані 40 калібрів, що є робочим положенням для промислових верхніх продувних фурм кисневого конвертера, складає при надлишковому тиску 200 кПа 210 м/с, а при 300 кПа – 150 м/с.

Оцінка газодинамічних осрбливостей газового струменя, що витікає з циліндричного сопла певного діаметра за допомогою стенду холодного моделювання з використанням води у якості модельної рідини показала наступне. По-перше, було відмічено значне розбризкування рідини при продуванні з надлишковим тиском більше 100 кПа. Щодо глибини занурення газового струменя у рідину встановлено, що при розміщенні продувного пристрою із циліндричним соплом на висоті 40 калібрів (рис. 7) глибина занурення газового струменя у рідку ванну склала при надлишковому тиску 100 кПа – $76 \cdot 10^{-3}$ м, при 200 кПа – $84,4 \cdot 10^{-3}$ м, а при 300 кПа – $90 \cdot 10^{-3}$ м. Відповідно до отриманих результатів математичного моделювання можна відзначити, що за умов переходу продувки газовим струменем до режиму з утворенням «бочкоподібних» ущільнень при переході режиму продувки з 100 кПа до 200 кПа глибина лунки занурення збільшується приблизно на 12% відн.

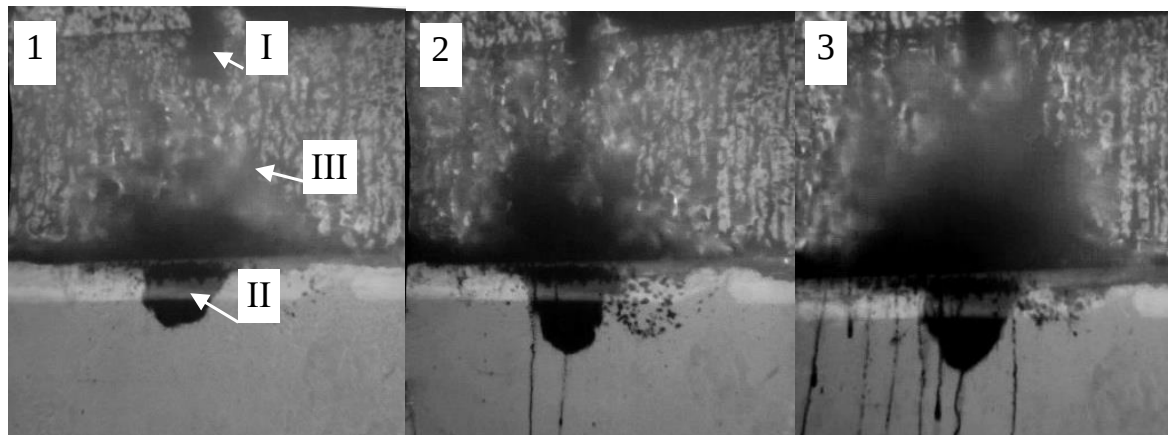


Рисунок 7 – Характерні тіньові фото продувки водної моделі при розміщенні продувного пристрою на висоті 40 калібрів при різному надлишковому тиску продувного газу: 1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа.

I – наконечник продувної фурми, II – лунка занурення газового струменя у рідину,
III – сплески рідини

Подальше збільшення енергії струменя зі збільшенням тиску продувного газу до 300 кПа приводить до меншого ефекту – збільшення глибини занурення на 6 % відн. Відповідно, енергія газового струменя розподіляється на «збільшення» енергії «бочкоподібних» ущільнень. Які, ймовірно, значно відображаються у активному розхитуванні та розбризкуванні ванни.

Відповідно до наявної у [17] методики за даними тиску у газовому струмені та з урахуванням впливу температури на гідродинамічні показники продувного струменя, було проведено розрахунок глибини занурення газового струменя у рідку металеву ванну. Оцінка можливої глибини занурення газових струменів за умов проникнення у рідкі шлаковий (із висотою 0,025 м за умов моделювання у 60 кг моделі кисневого конвертера [18]) та металевий розплави показала наступне. Розрахунки були проведені для умов заглиблення продувного газу у шлакову й металеву фази (рис. 8). Відмічено, що залежність глибини занурення газового струменя має ступеневий характер й при збільшенні надлишкового тиску збільшується достовірність отриманих математичних рівнянь, що описують вказані залежності. Було відмічено, що за умов, обраних для проведення аналізу, можливість проникнення газових струменів, що витікають з циліндричного сопла, при розміщенні продувного пристрою на висоті 40 калібрів при врахуванні і шлакового, і металевого розплаву зможе скласти 56 – 65 % середньої висоти шлакового розплаву. Тобто циліндричні сопла сприятимуть перемішуванню шлакового розплаву. При розміщенні продувної фурми на меншій висоті – 30 калібрів продувного сопла, можна очікувати значно глибше занурення газового струменя з повним проникненням крізь шар шлаку при продувці з надлишковим тиском 200 – 300 кПа і, навіть, проникнення у глиб металевого розплаву.

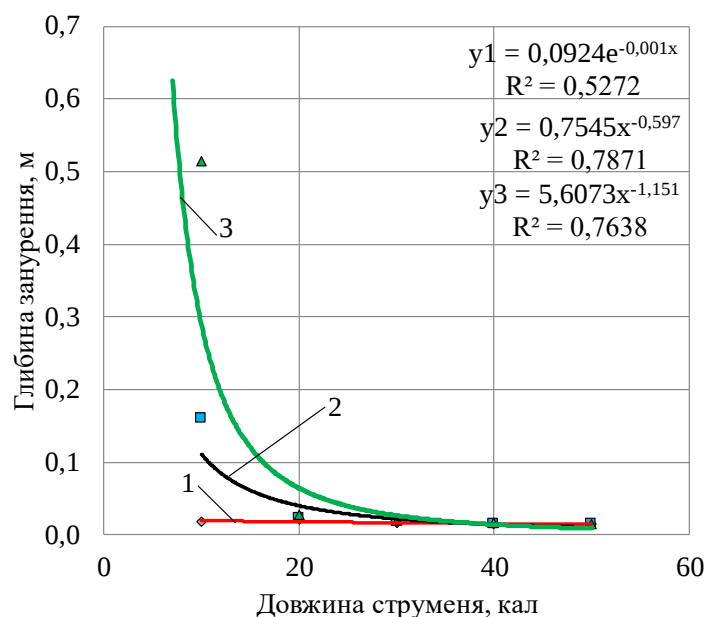


Рисунок 8 – Розрахунок глибини занурення газового струменя у рідку металеву ванну за умов проникнення у шлакову й металеву фази при різному положенні продувного пристрою за висотою при різному надлишковому тиску продувного газу:
1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

Висновки.

Проведене комплексне багатопланове дослідження газодинамічних особливостей використання сопел циліндричної конструкції стосовно до умов киснево-конвертерної плавки. Встановлено, що для умов використання циліндричних сопел з висотою розташування на рівні 40 калібрів від поверхні спокійної ванни кінетичної енергії у газового струменя відповідно до встановлених значень швидкостей газового потоку не вистачає для повного пробиття шлакового розплаву. Однак достатньо для активного перемішування шлаку. При цьому при розміщенні продувного пристрою на 25% відн нижче вже сприятиме значному зануренню газового струменя з повним проникненням крізь шлаковий розплав.

Відмічено, що при переході до продувного режиму з утворенням «бочкоподібних» ущільнень у струмені зі зміною продувного тиску зі 100 до 200 кПа глибина занурення у модельну рідину – воду збільшується на 12 %, а при подальшому аналогічному збільшенні тиску до 300 кПа енергія

струменя у значній мірі перерозподіляється на ділянках ущільнення та глибина занурення збільшується тільки на 6 %.

Також проведені дослідження дали змогу зробити висновок, що верифікацію результатів математичного моделювання можливо проводити шляхом тіньової зйомки витікання газових потоків з сопел, які моделюються, за однакових з математичним моделюванням технологічних умов. Відзначено високий рівень візуального співпадіння отриманих результатів та значний рівень співпадіння фактично обчислених результатів за показником швидкості витікання газового струменя на різних ділянках за довжиною. Відмічено, що математичне моделювання має значні переваги як щодо візуалізації загальної картини особливостей розподілу швидкостей у струмені при витіканні з сопла, так і щодо визначення зміни величини швидкості у різних точках за осьовим направленням.

Таким чином, можна підсумувати, що використання циліндричних сопел у якості додаткових сопел, наприклад, другого ряду у дворядних соплових наконечниках, обґрунтовано для активного шлакоутворення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85373-6.00008-9>
2. 2024 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
3. Охотский В.Б., Величко А.Г., Лю Т.И., Молчанов Л.С. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Шихтовка. Металлургическая и горнорудная промышленность, 2016. №5. С. 12-15
4. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Теория и практика металлургии, 2010. т. 2. С. 31-38
5. Чернятевич А.Г., Мастеровенко Е.Л. Направления совершенствования конструкции кислородной фурмы на основе методов управления качеством. Збірник наукових праць ДДТУ Технічні науки, 2012. №3. С. 15–23
6. Молчанов Л.С., Чернятевич А.Г., Вакульчук В.В., Чубіна О.А. Комплексний техніко-економічний аналіз впливу конструкції верхніх продувальних пристроїв на основні показники виробництва сталі в кисневих конвертерах. Сучасні проблеми металургії, 2019. № 22. С. 62-72. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.07>
7. Golub T., Molchanov L., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the gas dynamic simulation stand. Science and Innovation, 2023. Vol. 19, No.24. P. 79-92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>

8. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications, 2002. 944 p
9. Mazumdar D., Evans J.W. Modeling of steelmaking processes. 1st Edition, 2010, 493 p
10. Яковлев Ю.Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов. Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: Науч. тр. ММИ. М.: Металлургия, 1991. С.32-44.
11. Баптизмаський В.І., Бойченко Б.М., Величко О.Г. та інші. Сталеплавильне виробництво: навч. посібн. К.: ІЗМН, 1996. 400 с.
12. Miller D.R. Atomic and molecular beam methods, edited by Giacinto Scoles. New York: Oxford University press: 1988.
13. Alam M., Naser J., Brooks G., Fontana A. Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process. Metallurgical and Materials Transactions B. , 2010. Vol. 41 (6). P. 1354-1367. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9436-7>
14. Абрамович Г.П. Прикладная газодинамика. М. 1991. 600 с.
15. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860. <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000045174.69463.6f>
16. Rapp-Kindner I., Ösz K., Lente G. The ideal gas law: derivations and intellectual background. ChemTexts., 2025. Vol. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s40828-024-00198-9>
17. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444. <https://doi.org/10.3390/coatings14111444>
18. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Металл и литье Украины, 2017. № 6-7. С. 17–21

REFERENCES

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85373-6.00008-9>
2. 2024 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
3. Ohotskiy V.B., Velichko A.H., Liu T.I., Molchanov L.S. (2016) Blowing processes in steelmaking technologies. Charging. Metallurgical and mining industry. №5. P. 12-15 [in Russian]
4. Cherniatevych A.H., Sigarev Ye.N, Cherniatevych I.V. (2010) New developments of oxygen lances designs and methods of bath blowing of 160-ton converters of OJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”. Theory and practice of metallurg. №2. P. 31-38 [in Russian]
5. Cherniatevych A.H., Masterovenko E.L. (2012) Directions for improving the design of an oxygen lances based on quality management methods. Collection of scientific papers of DDTU Technical Sciences. №3. P. 15–23 [in Russian]
6. Molchanov L.S., Cherniatevych A.H., Vakulchuk V.V., Chubina O.A. (2019) Comprehensive technical and economic analysis of the influence of the design of upper blowing devices on the main indicators of steel production in oxygen converters. Modern problems of metallurgy. № 22. P. 62-72. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.07> [in Ukrainian]

7. Golub T., Molchanov L., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the gas dynamic simulation stand. Science and Innovation, 2023. Vol. 19, No.24. P. 79-92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>
8. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. (2002) Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p
9. Mazumdar D., Evans J.W. (2010) Modeling of steelmaking processes. 1st Edition. 493 p
10. Yakovlev Yu.N. (1991) Physical and mathematical modeling of steelmaking processes. Theoretical and Practical Issues of Steelmaking. Moscow: Metallurgy, 1991. P. 32-44. [in Russian]
11. Baptizmanskii V.I., Boychenko B.M., Velichko O.H. and others. (1996) Steelmaking: a textbook. K. 1996. 400 p. [in Russian]
12. Miller D.R. (1988) Atomic and molecular beam methods, edited by Giacinto Scoles. New York: Oxford University press.
13. Alam M., Naser J., Brooks G., Fontana A. (2010) Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 41 (6). P. 1354-1367. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9436-7>
14. Abramovich H.P. (1991) Applied gas dynamics. 600 p. [in Russian]
15. Isaev S.A., Lysenko D.A. (2004) Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 77. P. 857–860. <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000045174.69463.6f>
16. Rapp-Kindner I., Ősz K., Lente G. (2025) The ideal gas law: derivations and intellectual background. ChemTexts. Vol. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s40828-024-00198-9>
17. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. (2024). Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings. Vol. 14(11). P. 1444. <https://doi.org/10.3390/coatings14111444>
18. Cherniatevych A.H., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. (2017) High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier tuyere. Metal and Casting of Ukraine. № 6-7. P. 17–21

Received 09.04.2025.

Accepted 02.05.2025.

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

T. Golub, L. Molchanov, O. Minai

COMPREHENSIVE STUDY OF GASDYNAMIC FEATURES OF JETS OUTFLOW FROM NOZZLES OF CYLINDRICAL DESIGN FOR OXYGEN CONVERTERS CONDITIONS

Abstract. *The oxygen converter process is the only competitive leader in the production of liquid steel. This is primarily due to the available different types of blowing devices that perform various functions during smelting and allow for rapid adaptation to changing technological conditions. The main types of nozzles for top blowing devices are*

Laval nozzles, which are used to supply the main oxygen flow, and cylindrical nozzles, which are more often used for postcombustion of exhaust gases. The results of a multifaceted study of the features of the gas jet outflow from the cylindrical nozzle are presented to clarify the rational limits of their use in the design of the top blown lances of an oxygen converter. It was conducted by shadow shooting methods when the gas stream flows into the free air environment and into a model liquid - water, and by mathematical modeling methods. In accordance with the industrial technological conditions of using nozzles, it was established that when the height of the cylindrical nozzles was 40 calibers from the surface of the calm bath, high indicators of the energy of the blowout gas and, accordingly, the gas flow velocities were achieved when the blowing gas was supplied with an excess pressure of at least 300 kPa. At the same time, the possibility of penetration into a real slag-metal melt under such conditions (when extrapolating calculations to a 60 kg laboratory model of an oxygen converter) was at the level of 56 - 65% of the height of the slag melt. It was noted that to increase the permeability of the gas jet flowing from the cylindrical nozzle, it is necessary to reduce the lance height by 25% relative.

The characteristic features of the change in the shape of the gas jet and the distribution of velocities along the length when the pressure of the blowing gas changes, and their influence on the actual depth of immersion of the gas jet in the model liquid - water, were noted. A conclusion was made about the feasibility of using cylindrical nozzles as second-row nozzles for multi-row upper lances.

Keywords: top blowing, cylindrical nozzle, gas jet, shadow shooting, mathematical modeling, immersion depth.

Голуб Тетяна Сергіївна, к.т.н., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Молчанов Л.С., к.т.н., заввідділом Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Мінай О.М., PhD, старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.