

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ ТА ЇХ ШВИДКОСТЕЙ У РІДКІЙ ФАЗІ ПРИ ПРОДУВЦІ КРИЗЬ СОПЛО ЛАВАЛЯ

Анотація. Киснево-конвертерний процес виробництва сталі постійно розвивається, а кожне вдосконалення потребує дослідження та відпрацювання робочих моментів у лабораторних умовах при невеликих базових витратах. У зв'язку із цим активно розвиваються методи чисельного моделювання, для реалізації яких найбільш актуальним та випробуваним часом й різними дослідженнями є прикладна програма ANSYS FLUENT. Вона має високу продуктивність та володіє широкими можливостями щодо обчислення гідродинамічних явищ. З використанням цієї програми було проведено дослідження формування та розподілу потоків у водному середовищі та у розплаві чавуну під дією газового потоку, який витікає з сопла Лавалю за умов продувки з тиском, що удвічі перевищує тиск навколишнього середовища. Проведена комплексна валідація результатів чисельного моделювання із залученням фізичного низькотемпературного та високотемпературного моделювання показали високий ступінь відповідності отриманим результатам. За результатами обчислення було встановлено, що величина швидкостей потоків в рідині на порядок менша, ніж початкова величина швидкості газового потоку, який виходить з сопла Лавалю, а найбільші швидкості потоків в рідині зосереджені в центральній частині ванни під кратером, який утворюється завдяки дії газового струменя на рідину. За умов продування води глибина кратеру й ділянка розповсюдження найвищих показників швидкості потоків удвічі більша, ніж за умов продувки чавуну. Відзначено, що у центральній частині ванни під кратером формується потік, який протидіє напрямку та впливу газового потоку, а за умов найбільшого занурення газового струменя у ванну утворюється декілька протинаправлених вертикальних потоків, що закінчуються вихроподібними утвореннями. Причому у металевій ванні кількість додаткових потоків більша. Отримані результати чисельного дослідження, порівняні з результатами реального фізичного моделювання у аналогічних умовах, мають важливий потенціал для поповнення бази даних щодо особливостей взаємодії газових потоків, які витікають з сопла Лавалю за



продувного тиску удвічі більшого за атмосферний з водним середовищем та рідким розплавом чавуну.

Ключові слова: киснево-конвертерний процес, верхня продувка, сопло Лаваля, гідро-газодинамічні процеси, чисельне моделювання.

Посилання для цитування: Голуб Т. С., Мінай О. М. Сучасні методи дослідження розподілу потоків та їх швидкостей у рідкій фазі при продувці кризь сопло Лаваля. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 433-453. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-026>

Виробництво сталі у кисневих конвертерах, особливо тільки з верхньою продувкою – це складний процес, у якому необхідно одночасно створити такі умови, які зможуть забезпечити протікання ряду важливих фізико-хімічних процесів, тобто складних явищ, що поєднують зміни у фізичному стані речовини (агрегатний стан, дифузія, розчинення) та її хімічному складі (утворення нових сполук, руйнування зв'язків) [1]. Першочерговими факторами впливу на перебіг тих чи інших процесів у кисневому конвертері є характеристики дуття. Наприклад, такий процес, як інтенсивне окислення вуглецю, як основної домішки при переділі чавуну на сталь, разом із підвищенням ступеня засвоєння кисню ванною можуть бути зумовлені «жорсткою» продувкою, яка забезпечується дуттьовими пристроями з вузько спрямованим глибоко зануреним у ванну потоком газу – окиснювачу, що сприяє інтенсивному, глибокому перемішуванню ванни. А прискорене «запалювання» плавки, сталі, інтенсивне шлакоутворення, збільшення ступеня окислення вуглецю до CO_2 над ванною відповідають «м'якому» типу продувки ванни, який, у свою чергу, зумовлюється більш широким потоком газу високо розташованим над ванною, що в більшій мірі залучає до перемішування верхні шари середовищ [2-5]. Розуміння цих підходів прийшло до науковців-металургів та промисловців емпіричним шляхом досліджень, випробувань та вивчення поведінки й взаємодії газового потоку з рідкою ванною [4, 6-11]. Однак киснево-конвертерний процес – це динамічна система, що постійно розвивається, тому й наразі актуальним залишаються різнопланові дослідження, які можуть надати нову інформацію щодо перебігу обмінних процесів у сталеплавильній ванні та сприятимуть оптимізації процесу виробництва сталі.

Через досить складні обмінні явища між рідкими шлако-металевими фазами та газовим потоком й складність безпосереднього спостереження за реальною продувкою у кисневому конвертері широкого загалу набуло фізичне моделювання киснево-конвертерного процесу на водних моделях у поєднанні з математичним/чисельним

моделюванням [12-16]. При цьому чисельне моделювання продувки конвертерної ванни набуло значної популярності серед інженерів металургів завдяки широкому спектру можливостей дослідження взаємодії газового струменя з рідкою ванною без застосування спеціальних дорогих пристроїв – фізичних моделей реальних конвертерних ванн та будь-якого впливу на навколишнє середовище, як, наприклад, за умов проведення фізичних високотемпературних досліджень з продувки залізобуглецевих розплавів [12, 17-18]. Завдяки цьому методу можливо швидко та різнобічно випробувати та дослідити нові технологічні конструкції продувних пристроїв та відпрацювати режими, за яких надалі можна їх використовувати на реальних металургійних об'єктах. Для цього важливим є накопичення різнопланового досвіду математичного/чисельного моделювання, яке проведене у порівнянні з реальними процесами моделювання на фізичних натурних системах, відпрацьованими у подібних змодельованих умовах.

Серед великої кількості наявних результатів досліджень у розвиток чисельного математичного моделювання гідродинамічних явищ під час продувки у кисневих конвертерах значний внесок зробили Самохвалов С. Є., Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Szekely J. та інші, заклавши основи моделей гідродинамічної взаємодії між газовим потоком та рідкою металевою ванною під час продувки газовими струменями [19-21]. Однак з розвитком та набуттям доступності обчислювальних програм, найбільш розповсюдженим у світі стало чисельне моделювання з використанням середовища ANSYS Fluent, яке передбачає чисельне моделювання гідро-газодинамічних явищ [12]. Під час проведення чисельного моделювання процесу продувки рідкої ванни відбувається розв'язання рівняння нерозривності та рівняння Нав'є-Стокса з урахуванням стисливості надзвукового струменя продувного газу у системі координат з налаштованою межею [22]. Результатом розв'язання цих рівнянь є розподіл тиску та швидкості в заданій для обчислення області. Оскільки в цьому процесі швидкості потоків, особливо газового, досить високі, ці моделі також повинні враховувати турбулентний потік середовища.

Для досягнення найкращої продуктивності верхньої продувки в базовому кисневому конвертері зазвичай використовуються різні типи збіжно-розбіжних сопел типу Лавала [23-25]. Збіжна ділянка прискорює дозвуковий газовий потік в найвужчій частині сопла – критичному перетині, до швидкості звуку із величиною Маха 1, а розбіжна ділянка потім розширює газ до надзвукових швидкостей. Таке сопло створює високосфокусований, стабільний та високошвидкісний надзвуковий струмінь [26-27]. При цьому сопла Лавала працюють найкраще, коли

співвідношення між вхідним та вихідним тиском навколишнього газового середовища достатньо високе, щоб забезпечити дросельний потік у критичному перетині та повне розширення на виході, що зазвичай вимагає вхідного тиску, який щонайменше в 2–4 рази перевищує тиск навколишнього середовища [23,28]. Однак, найчастіше, в літературі зустрічаються результати чисельного моделювання, яке проведено для умов продувки з невисокими швидкостями та витратами продувального газу через проведення порівняння цими авторами своїх результатів із наявними в літературі аналогічними умовами фізичних досліджень [10,12,13].

Метою дослідження було визначення особливостей розподілу потоків, що виникають у рідкій фазі при продувці її газом зверху крізь сопло Лавалю та уточнення їх швидкостей за умов продувки з тиском, який у два рази перевищує тиск навколишнього середовища.

Дослідження було проведено шляхом чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення ANSYS Fluent. Для моделювання було обрано сопло Лавалю, яке розміщувалося відносно рідкої ванни (води та розплаву чавуну) та продувалося з тиском газу, який дорівнював двократному перевищенню тиску навколишнього середовища – 2 кПа. Схематичне зображення умов дослідження наведено на рис. 1.

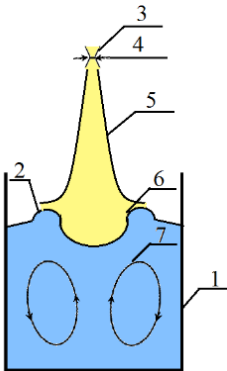


Рис. 1 – Схематичне зображення умов дослідження: 1 – модельна ємність; 2 – модельна рідина; 3 – сопло Лавалю з критичним діаметром – 4; 5 – газований струмінь; 6 – кратер, який утворюється під дією газового струменя у рідчині; 7 – потоки, що ініціює газований струмінь у рідчині

Процедура моделювання складалася з таких етапів: побудова геометрії продувних сопел та рідкої ванни, вибір сітки для моделювання, вибір конфігурації математичної моделі, розрахунок та аналіз результатів. У якості продувального сопла обрано сопло Лавалю з критичним діаметром 3,2 мм (діаметр обрано відповідно до лабораторного сопла Лавалю з використанням якого проводилися фізичні дослідження з реальними фізичними рідинами для валідації результатів моделювання), а у якості рідкої ванни циліндрична ємність,

яку заповнено водою чи розплавом чавуну. З урахуванням розміру дослідного сопла та з метою уникнення використання надмірно складної обчислювальної сітки була побудована 2D-модель внутрішньої порожнини сопла без урахування товщини стінок. Обрані припущення мало впливали на процес та результати моделювання гідро-газодинамічних процесів. Для раціонального обчислення було обрано 2D осісиметричний тип моделі для створення обчислювальної сітки, оскільки геометрія сопла та рідкої ванни симетрична відносно центральної осі. Для струменя, що втікає в незакручений потік, тривимірні ефекти не є домінуючими, а осісиметрична 2D модель точно описує основні газодинамічні характеристики, такі як глибина та ширина кратеру, що утворюється під дією газового струменя у рідині, деформація поверхні й розподіл швидкостей вздовж осі. Такий підхід є загальноприйнятим у дослідженнях подібного типу [29,30]. Розрахунок проведено з використанням моделі Volume of Fluid (VOF), яка належить до класу багатофазних моделей (Multiphase Models), та із застосуванням двокомпонентного рівняння $k-\epsilon$ зі стандартною функцією стінки для опису турбулентності. В цьому методі змінними поля потоку є: швидкість, тиск та об'ємна частка, які є складовими рівнянь маси та імпульсу. У методі VOF, реалізованому у Fluent, рівняння імпульсу розв'язуються по всій області, а результуюче поле швидкості розподіляється між фазами [31,32]. Границя розділу газ-рідина під час розрахунку оновлювалася у всіх комірках розділу за допомогою геометричної (кусково-лінійної) реконструкції. Стабільні перехідні розв'язки можуть бути отримані з відносно малими кроками за часом, зазвичай між $1 \cdot 10^6$ та $1 \cdot 10^4$ с. VOF метод використовується для моделювання середовищ, що не змішуються, відстежуючи чітку межу розділу між ними.

Фізичні властивості середовищ, між якими передбачається взаємодія (газового струменя та рідин) зібрані у таблиці 1. Для валідації результатів чисельного моделювання було проведено співставлення отриманих чисельних даних із результатами фізичного низько- та високотемпературного моделювання з використанням однакового вказаного вище сопла, яке розміщено відносно поверхні спокійної рідини на висоті 20 калібрів. Тиск продувального газу 200 кПа. Низькотемпературне моделювання було проведено шляхом верхньої продувки води повітрям за температури 25 °C на прозорій скляній 100 кг ємності з пласкою передньою стінкою задля зменшення викривлення зображення при спостереженні. Високотемпературне моделювання було проведено шляхом продувки біля пласкої прозорої стінки за методом Чернятевича А. Г. під керівництвом Семикіна С. І. на 40 кг моделі з продувкою зверху технічним киснем розплаву чавуну за

температури 1400 – 1500 °С [33]. До аналізу було прийнято період продувки на високотемпературній моделі до періоду запалювання плавки через те, що процес окислення компонентів залізо-вуглецевого розплаву, який супроводжується горінням та утворенням об'ємів газу CO, сильно змінює вигляд кратеру взаємодії газового струменя з рідиною [34]. Реєстрація ходу продувки на обидвох моделях здійснювалася відеокамерою CASIO EXILIM EX F1.

Таблиця 1 – Фізичні властивості змодельованих середовищ

Середовище	Температура, °С	Густина, кг/м ³	В'язкість, кг/м·с·10 ⁻⁵	Поверхневий натяг, Н/м
Повітря	25	1,17	1,79	-
Кисень	25	1,26	2,10	-
Вода	25	997	89,0	0,072
Чавун	1600	6800	350,0	1,4

З метою валідації результатів чисельного моделювання та аналізу отриманих результатів спочатку було проведено співставлення результатів моделювання початкового періоду продувки води (наведено на рис. 2) та розплаву чавуну (на рис. 3). На рисунках наведено кадри зміни поверхні рідини під дією газового струменя, який витікає з сопла Лавала, з інтервалом 0,05 секунди.

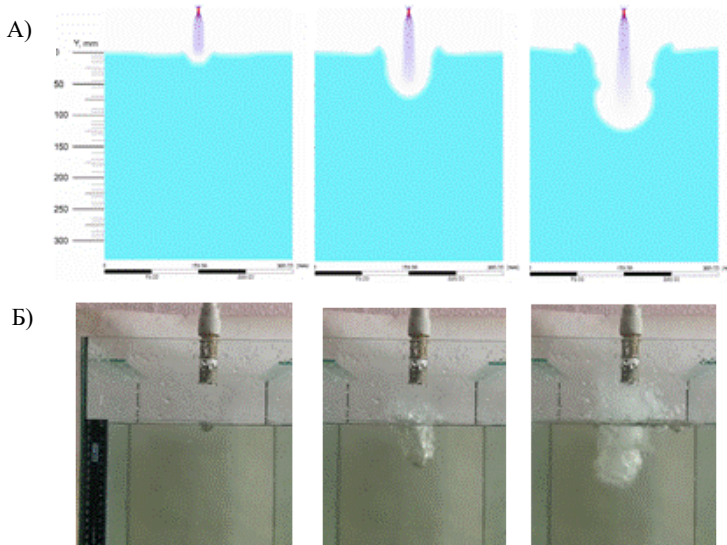


Рисунок 2 – Початковий період продувки водної низькотемпературної моделі за результатами чисельного (А) та фізичного (Б) моделювання

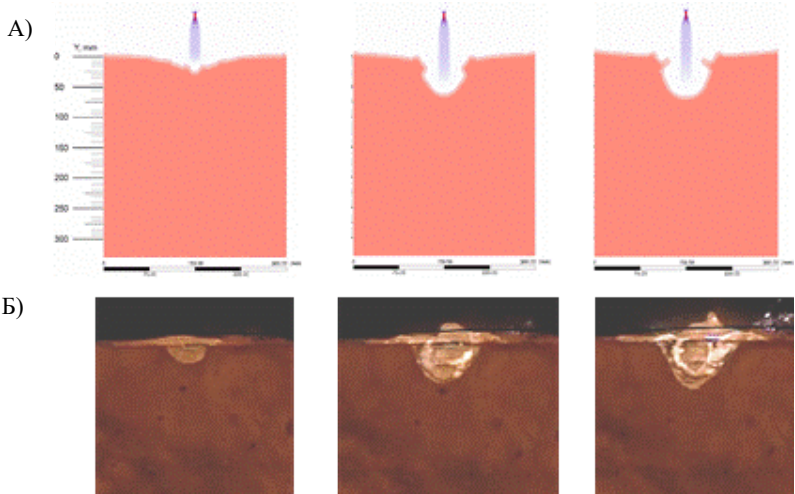


Рисунок 3 – Початковий період продувки високотемпературної моделі за результатами чисельного (А) та фізичного (Б) моделювання

Також проведено співставлення кадрів продувки за результатами чисельного та фізичного моделювання за умов сталого режиму продувки (на рис. 4 та 5 наведено характерні послідовні ділянки з інтервалом 0,5 секунди).

Відповідно до рис. 2 та 3 можна зробити висновок, що отримані чисельні результати у значній мірі відповідають реальній картині продувки початкового періоду за формою та величиною утвореного кратеру. Слід відзначити, що така зміна поверхні ванни відповідає відомим «кулеподібній» формі кратеру та подовженій «кулеподібній» формі кратеру відповідно до тверджень дослідників Molloy N.A. (початкова форма) та Охотського В.Б. (подальший розвиток форми кратеру) [9-11]. Такі форми кратеру зазначені як за результатами низькотемпературного моделювання, так і за результатами високотемпературного з дещо меншою (у два рази й більше) глибиною утвореного кратеру за умов останнього типу моделювання. Також необхідно відзначити, що за результатами чисельного моделювання в початковий період продувки чітко видно формування піднятого краю кромки кратеру, однак не простежується формування дрібних бризок, які є як результуючими відбивання газового потоку від донної частини кратеру та і результатом відриву крапель з краю кромки кратеру, що пов'язано з особливостями моделювання в обраній системі. Отримані результати за початковий період продувки схожі з результатами інших дослідників, які аналізували продувку за невисоких швидкостей газу [10, 35].

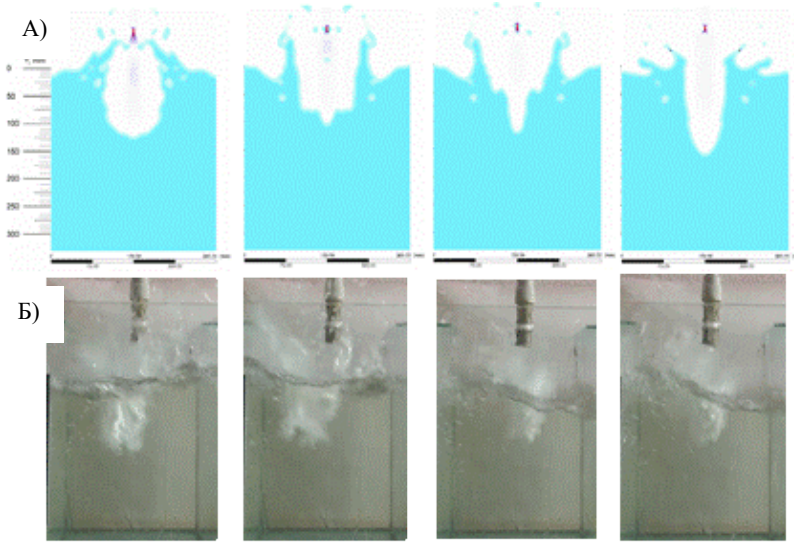


Рисунок 4 – Продувка низькотемпературної моделі за результатами чисельного (А) та фізичного (Б) моделювання

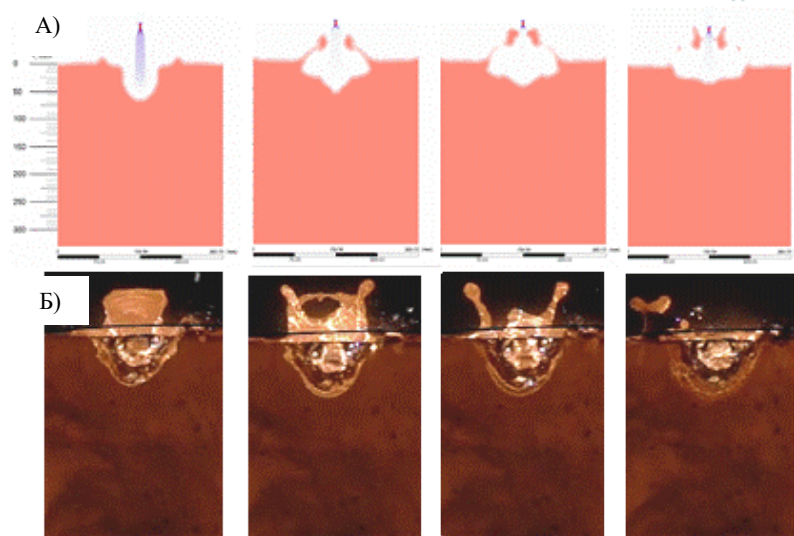


Рисунок 5 – Продувка високотемпературної моделі за результатами чисельного (А) та фізичного (Б) моделювання

Аналіз співставлення сталого режиму продувки вказує на відмінні від вище наведених результатів та відомих форм кратеру (див. рис. 4 та 5). Форма кратеру змінюється від опуклого витягнутого еліпсоїду до більш складної форми, коли донна частина кратеру підіймається вгору зі значним витягуванням кромки кратеру вгору до продувної фурми та, як наслідок, утворенням значної частини сплесків рідини. Причому це характерно для обох типів продувної ванни: як для води, так і для рідкого розплаву чавуну. Такий режим продувки пов'язаний з так званим режимом «незатопленого» струменя, який в реальних промислових умовах характерний для періоду продувки до утворення шлаку та періодів, коли шлак значно осідає.

Відповідно до валідації за результатами низько- та високотемпературного моделювання був зроблений висновок, що отримані результати чисельного моделювання можуть бути використані для подальшого аналізу щодо розподілу потоків у рідкій фазі за встановлених умов продувки. Дослідження розподілу потоків у рідкій ванні проведене для умов продувки двох варіантів моделей: низькотемпературної – за умов продувки води повітрям, й високотемпературної – за умов продувки рідкого чавуну киснем (без урахування впливу хімічних реакцій в цьому випадку). За результатами чисельного дослідження було встановлено, що найбільші швидкості середовища відповідають ділянці сопла – близька підфурмена зона (невелика ділянка під продувним соплом). Згори вниз до розплаву доходить струмінь з меншою швидкістю й, відповідно, енергією, ніж була початковою на виході з сопла Лаваля через опір навколишнього середовища агрегату, а у розплаві рух потоків має на порядок нижчий рівень швидкостей [36]. На рис. 6 наведено приклад розподілу швидкостей потоків у середовищах, що взаємодіють під час верхньої продувки водного середовища та розплавленого чавуну у період початку продувки (ліва частина кожної з проєкцій результатів моделювання представляє карту потоків, позначених стримерами, які вказують напрямок потоку та величину значень швидкості потоку відповідно до кольору, а права частина – загальний вигляд процесу взаємодії модельних фаз та зміну межі розподілу газ – рідина у момент фіксації результатів обчислення).

Відповідно до отриманих результатів видно, що з сопла Лаваля струмінь газу витікає зі швидкістю на рівні 300 м/с, а коли доходить до поверхні ванни, яка розташована на відстані 20 калібрів сопла, швидкість потоку знижується удвічі. Надалі, відповідно за представлених умов проєкції результатів розрахунку (без обмежень верхньої межі величин) аналізувати потоки, що утворюються в рідині не дуже зручно через неможливість розрізнити зміни у величинах

швидкостей за кольором стримерів, які у рідині мають невеликі значення у порівнянні з вихідним потоком. Тому для аналізу потоків в рідинах було прийнято проєкції результатів чисельного моделювання з обмеженням верхньої межі швидкості на рівні 0,1 м/с. Відповідно, для прикладу на рис. 7 наведено таку проєкцію для умов продувки низькотемпературної та високотемпературної моделей за той же початковий період продувки ванни.

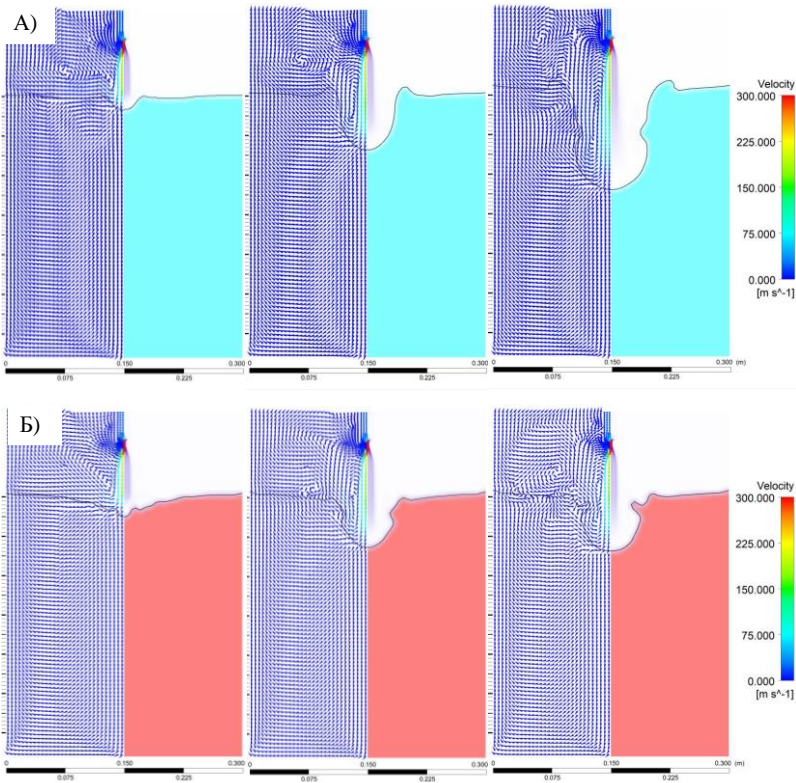


Рисунок 6 – Розподіл швидкостей руху середовищ при чисельному моделюванні низькотемпературної (А) та високотемпературної (Б) продувки зверху. Проєкції з інтервалом 0,05 с без обмеження верхньої межі швидкостей під час просціювання результату.

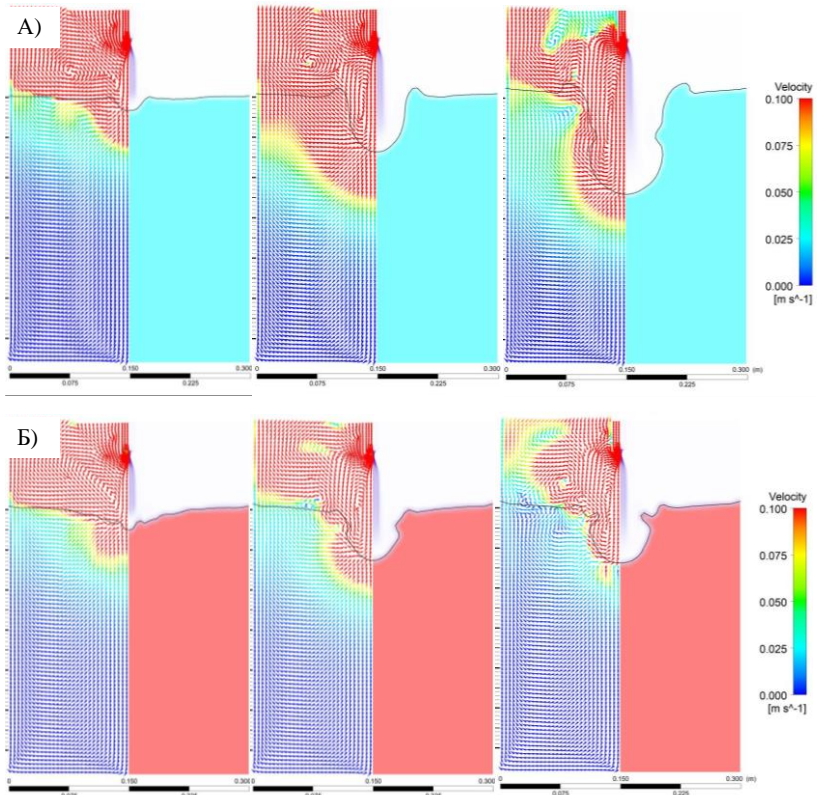


Рисунок 7 – Розподіл швидкостей руху середовищ при чисельному моделюванні низькотемпературної (А) та високотемпературної (Б) продувки зверху. Просекції з інтервалом 0,05 с з верхньою межею швидкостей під час просіювання 0,1 м/с.

Представлені в такому варіанті результати значно наочніші. Видно, що для обох варіантів моделювання під межею розділу газове середовище – рідка ванна розташована ділянка підвищеної швидкості потоків, межі якої періодично, циклічно змінюються разом зі зміною форми кратеру. Зазначено, що для умов продувки низькотемпературної моделі глибина розповсюдження полів у рідині з більшими величинами швидкостей приблизно у два рази більша, ніж за умов продувки високотемпературної моделі. Це зумовлено значним опором впливу газового струменя рідкої ванни чавуну з вищими у 7 разів густиною та у 14 – 25 разів більшим поверхневим натягом ніж у воді. Проаналізовані за ходом продувки у сталому режимі результати

чисельного моделювання (на рис. 8 наведено приклад проєкцій розподілу швидкостей потоків у середовищах, що взаємодіють у сталому режимі продувки, за умов низькотемпературного та високотемпературного моделювання) дозволили виділити наступні особливості розподілу потоків в залежності від середовища ванни та форми кратеру. Для умов продувки води у змодельованих умовах встановлено, що основний напрямок потоку в центральній частині ванни спрямований знизу вгору, а вздовж стінок моделі – згори вниз. Це зумовлено ударною та відбивною дією газового струменя на поверхню ванни, яка змушує рухатися від центру по периферії поверхневі шари рідини й при зустрічі зі стінками моделі спускатися вздовж них до днища. Максимальні величини швидкості потоку розповсюджуються на глибину ванни до 78 – 80 калібрів у центральній частині ванни та 45 – 50 калібрів на периферії. Швидкість потоків в ванні залежить від особливостей взаємодії газового струменя з поверхнею ванни. Так в періоди максимального занурення газового струменя імпульс від потоку передається ванні й має деяку інерційність розповсюдження вглиб об'єму у часі, й, коли дно та стінки кратера починають підніматися вгору до продувної фурми, швидкість потоків у центральній частині ванни ще досить велика на достатньо великій глибині. Це відбувається через деяку інерційність зворотного імпульсу протидії удару газового струменя рідкою ванною. У період максимального занурення газового потоку формуються вихроподібні потоки у центральній частині під кратером та у найвіддаленіших периферійних ділянках ванни завдяки появі додаткового центрального потоку з протилежним центральному потоку напрямом руху згори вниз та відповідною зміною напрямку пристінкового потоку. У період підйому донної частини кратера з підйомом рідини до фурми та утворенням сплеску центральний напрямок руху спрямований вгору, а вихроподібні потоки більше зосереджуються у приповерхневій частині ванни у підфурменій області. В проміжній між пристінковою та центральною ділянками ванни в цей період відбувається горизонтальний рух потоків.

У цей період найвіддаленіші ділянки ванни мають найнижчі показники швидкостей потоку без зміни напрямку чи утворення вихрів. Й така поведінка ванни та розподіл швидкостей потоків повторюється циклічно з інтервалом 0,6 – 1,0 с. Щодо продувки рідкої ванни чавуну відзначено, що у сталому режимі продувки також із найглибшим зануренням у ванну з формуванням глибокого кратеру газовий струмінь передає імпульс рідкій ванні. Завдяки зворотній протидії газовому потоку в рідкій ванні чавуну, за аналогією з водяною ванною, формуються поверхневі потоки, які спрямовані до стінок ванни. Вони

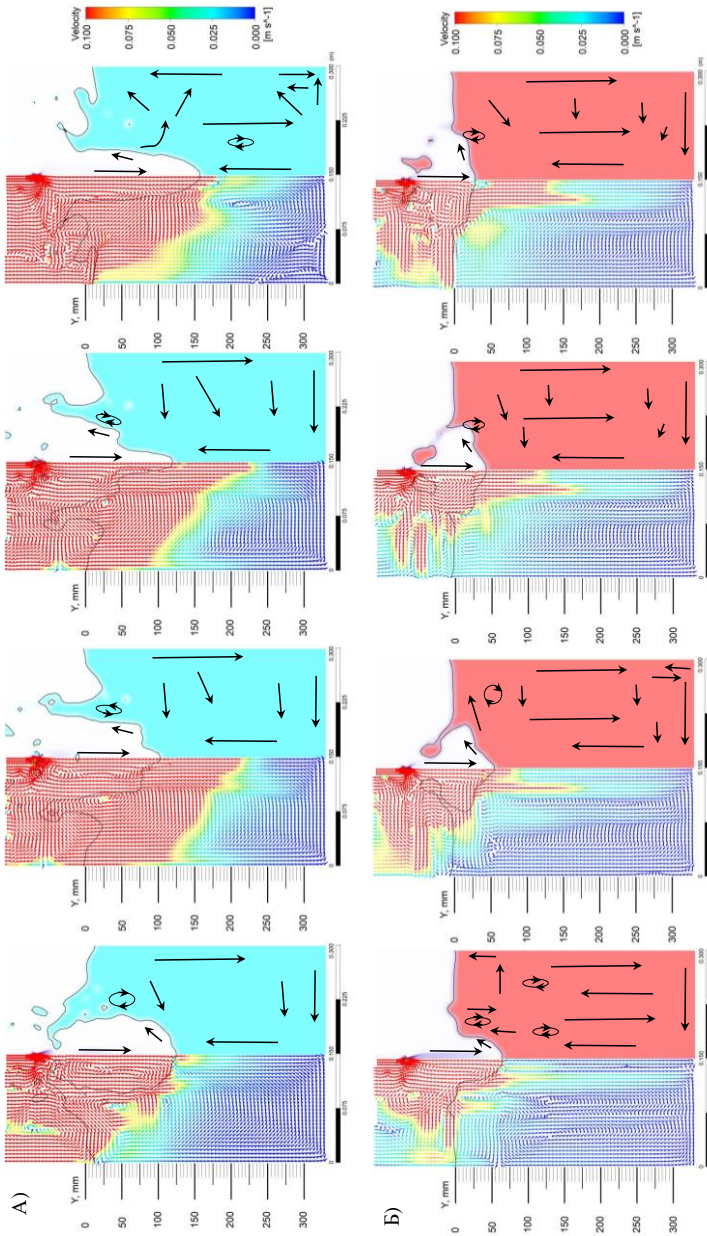


Рисунок 8 – Розподіл швидкостей руху середовищ при чисельному моделюванні низькотемпературної (А) та високотемпературної (Б) продувки зверху у сталому режимі продуквки. Проекції з інтервалом 0,1 с з верхньою межею швидкостей під час проєціювання 0,1 м/с. стрілками вказано узагальнений напрям руху.

опускаються вздовж стінок до днища з формуванням центрального висхідного потоку та проміжних горизонтальних потоків. Й також розповсюдження найбільших величин потоків у підфурменій зоні (під кратером) має деяку інерційність, тобто наявність ділянки підвищених показників швидкості потоків відзначається в період, коли дно кратеру підіймається вгору. Однак слід відзначити, що на відміну від продувки води, за умов продувки рідкого чавуну під час найбільшого занурення струменя у сталому режимі продувки спостерігаються не один додатковий зворотній вертикальний потік, а декілька з формуванням вихроподібних ділянок на глибині 1/3 ванни. Це, ймовірно, зумовлено накладанням основного імпульсу руху ванни, що надається газовим струменем при ударі о поверхню, на імпульс зворотної хвилі від стінок ванни через більшу інертність густого, в'язкого середовища чавуну з високим поверхневим натягом. У підтвердження цього можна відмітити, що низхідні потоки, які формуються вздовж стінок ванни, проявляються до 30 % діаметру ванни від периферії в напрямку центру, проти 10 – 15 % за умов продувки води, зі зменшеною часткою горизонтальних потоків. І центральна частина з висхідним потоком має ширину до 20 % діаметра ванни проти 25 – 30 % за умов продувки води. Відповідно, за проаналізованих умов продувки рідкого чавуну у більшій мірі до руху залучені приповерхневі шари та центральна частина ванни на відміну від продувки води, для якої у періоди найбільшого занурення струменя до руху залучається до 70 – 80 % ванни.

Висновки

Відповідно до наведених у роботі даних було проведено дослідження та визначення особливостей розподілу потоків, що виникають у рідкій фазі при продувці її газом зверху крізь сопло Лавалю за тиску 2 кПа та уточнення їх швидкостей шляхом проведення чисельного моделювання з використанням прикладної програми ANSYS FLUENT. Проведення валідації результатів чисельного моделювання за допомогою фізичного низькотемпературного та високотемпературного досліджень з використанням аналогічних змодельованих умов продувки було встановлено досить високу збіжність візуальних показників взаємодії газового струменя з рідкою ванною, що представлена водою та розплавом чавуну. Зазначено формування як раніше відомих та відзначених в літературі форм кратеру, який утворюється у рідині під дією газового струменя, так і відмічені раніше не зазначені особливості форм кратеру, які утворюються при сталому режимі продувки незатопленим струменем при тиску 2 кПа.

Результати обчислення розподілу потоків в змодельованих рідинах та величини їх швидкостей дозволили встановити такі особливості потоків при продувці газовим потоком зверху за тиску 2 кПа:

- величина швидкостей потоків в рідині на порядок менша, ніж початкова величина швидкості газового потоку, який виходить з сопла Лавала;

- найбільші швидкості потоків в рідині зосереджені в центральній частині ванни під кратером й проявляються після найглибшого занурення газового потоку в рідину. Причому за умов продування води глибина кратеру більша й у два рази більша ділянка розповсюдження найвищих показників швидкості потоків;

- у центральній частині ванни під кратером формуються протинаправлений дії газового струменя потік, який ініціює загальну циркуляцію ванни від центру вгору, далі до периферії й вздовж стінок ванни вниз та вздовж днища до центру;

- під час максимального занурення газового потоку у ванну під кратером утворюються вихроподібні потоки, які ініціюють декілька різноспрямованих потоків, що сприяють перемішуванню ванни. Причому у металевій ванні кількість додаткових потоків більша.

Отримані результати чисельного дослідження, порівняні з результатами реального фізичного моделювання у аналогічних умовах, мають важливий потенціал для поповнення бази даних щодо особливостей взаємодії газових потоків, які витікають з сопла Лавала за продувочного тиску удвічі більшого за атмосферний з рідкими середовищами різних властивостей та можуть бути основною для подальшого проведення чисельного моделювання подібних процесів без залучення фізичних моделей для підтвердження отриманих результатів.

Перелік посилань

1. Охотський В. Б., Костьолов О. Л., Сімонов В. К., Ковальов Д. А., Тараканов А. К., Кучер А. Г., Яковлев Ю. М. Теорія металургійних процесів. К., 1997. 507 с.

2. Сущенко А. В. Развитие конструкций кислородно-конвертерных фурм с центральным сопловым модулем. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. : Технічні науки.* 2011. Вип. 22. С. 60–67

3. Вергун А. С., Чернятевич А. Г., Нестеров А. С., Чайка А. Л., Тогобицкая Д. Н., Кисляков В. Г., Молчанов Л. С. Современный технологический маршрут конвертерного производства качественного железобудничного полупродукта в сырьевых и энергетических условиях Украины. *Метал та лиття України.* 2020. № 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.30>.

4. Зражевский А. Д., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Гриценко А. С. Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в

конвертерных цехах Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 20–30.

5. Venkata Lakshmi M., Chandra Mouli K. V. V. N. R. Study of oxygen blowing lance and it's drive mechanism in LD converters. *International journal and magazine of engineering, Technology, management and research*. 2017. Vol. 4 (4). P. 53–56

6. Чернятевич А. Г. Направления совершенствования комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 28. С. 147–160.

7. Чернятевич А. Г., Вакульчук В. В. О повышении эффективности верхней продувки конвертерной ванны. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2015. Вып.30. С. 130–147

8. Сущенко А. В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Призовського державного технічного університету*. 2009. вып. 19. С. 36–41

9. Molloy N. A. Impinging jet flow in a two phase system: The basic flow pattern. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1970. Vol. 208. P. 943–950.

10. Sato S., Ando M., Okada J., Ueda Y., Iguchi M. Prediction of plunging depth induced by top lance gas blowing onto a low-melting-point metal bath. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60(8). P. 1675–1683. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-125>

11. Okhotskii V. B. Top injection of the steel-smelting bath with deep penetration: A model. *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38 (6). P. 424–428. <https://doi.org/10.3103/S0967091208060028>

12. Cao L., Wang Y., Liu Q., Feng X. Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*. 2018. Vol. 58(4). P. 573–584. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-680>

13. Goncalves F., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J. Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. P. 834–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.050>

15. Zhang L., Qi F., Liu Z., Cheung S. C. P., Li B. Investigation of droplet splashing behavior relevant to molten steel flow: a full-scale water model study using VOF–DPM and Eulerian wall film model. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2026. Vol. 57(3). P. 1568–1588. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03941-w>

16. Hwang H. Y., Irons G. A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. *Metall. Mater. Trans. B*. 2012. Vol. 43. P. 302–315. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>.

17. Odenthal H. J., Emling W. H., Kempken J., Schlüter J. Advantageous numerical simulation of the converter blowing process. *Iron & Steel Technology*. 2007. Vol.4 (11). P. 71–89

18. Errson M., Tillander A. Review on CFD simulation and modeling of decarburization processes. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89(1). Art. 1700108. <https://doi.org/10.1002/srin.201700108>

19. Самохвалов С. Є., Косухіна О. С. Чисельні методи в розрахунках металургійних агрегатів. Дніпродзержинськ, видавництво ДДТУ, 2009. 103 с.

20. Szekely J., Asai S. Turbulent fluid flow phenomena in metals processing operations: Mathematical description of the fluid flow field in a bath caused by an impinging gas jet. *Metall. Trans.* 1974. Vol. 5. P. 463–467. <https://doi.org/10.1007/BF02644115>

21. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Зуєв О. І. Математична модель гідродинамічних процесів у багатофазному середовищі в порожнині конвертера під час продувки розплаву металу газовими струменями з частковою передачею імпульсу на межі розподілу зон. *Математичне моделювання*. 2002. №1(8). С. 77–80.

22. Ferziger J. H. and Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Springer Science & Business Media, Berlin, 2002. 309 p.

23. Zucker R. D., Biblarz O. Fundamentals of gas dynamics, 2nd ed., Wiley, Hoboken, NJ, 2002. 493 p.

24. Bhattacharya T., Zhan L., Chukwulebe B. Design considerations for supersonic oxygen lances in a Basic oxygen furnace. 2016. Conference: SCANMET V at: Lulea, Sweden. 12-15 June, 2016.

25. Liu F., Sun D., Zhu R., Li Y. Characteristics of flow field for supersonic oxygen multijets with various Laval nozzle structures. *Metall. Trans. B.* 2019. Vol. 50. P. 2362–2376. <https://doi.org/10.1007/S11663-019-01652-7>

26. Okhotskii V. B. Structure of gas jets. *Steel in the USSR*. 1983. Vol.13(11). P. 489–490

27. Капустин Е. А., Лухтура Ф. И. Одномерная теория струй. *Вісник приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2001. Вип. 11. С. 243–249

28. Rathakrishnan E. Applied Gas Dynamics, 2nd Edition. Wiley, 2019. 656 p.

29. Kruskopf A. A 2D axisymmetric mixture multiphase model for bottom stirring in a BOF converter. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2017. Vol. 48(1). P. 619–631. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0856-x>.

30. Nguyen A. V., Evans G. M. Computational fluid dynamics modelling of gas jets impinging onto liquid pools. *Applied Mathematical Modelling*. 2006. Vol. 30. Iss. 11. P. 1472–1484. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.015>

31. 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>

32. Welch S. W. J., Wilson J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change. *J. Comput. Phys.* 2000. Vol.160(2). P. 662–682. <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6481>

33. Chernyatevich A. G., Zarvin E. Y., Volvovich M. I. Observation through a transparent wall of the behavior of a basic oxygen furnace bath during injection. *Steel USSR*. 1975. Vol. 5. P. 79–81

34. Semykin S. I., Golub T. S., Dudchenko S. A. Direct observation of high-temperature areas of metal melt at oxygen converter blowing with low voltage application. *Sci. in nov.* 2021. Vol. 17, No. 4. P. 44–54. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.044>

35. Barron M. A., Medina D. Y., Reyes J. Interaction between a liquid surface and an impinging gas jet. *World Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 9. P. 793–803. <https://doi.org/10.4236/wjet.2021.94055>

36. Лухтура Ф. И. О степени усвоения кислорода металлической ванной при верхнем вдуве в LD-конвертер. *Вісник приазовського державного технічного університету. Технічні науки.* 2018. Вип. 36. С. 39–53
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142513>

References

1. Okhotskii, V. B., Kostiolov, O. L., Simonov, V. K., Kovaliov, D. A., Tarakanov, A. K., Kucher, A. H., & Yakovlev, Yu. M. (1997). *Teoriia metalurgiinykh protsesiv* [Theory of metallurgical processes]. Kyiv. [in Ukrainian]
2. Sushchenko, A. V. (2011). *Razvitie konstruktsii kislorodno-konverternykh furn s tseentralnym soplovyim module* [Development of designs of oxygen-converter lances with a central nozzle module]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Ser.: Technical Sciences*, 22, 60–67. [in Russian]
3. Verhun, A. S., Cherniatevych, A. G., Nesterov, A. S., Chaika, A. L., Tohobitskaia, D. N., Kisliakov, V. G., & Molchanov, L. S. (2020). *Sovremennyi tehnologicheskii marshrut konverternogo proizvodstva kachestvennogo zelezouglerodistogo polprodukta v syrevykh i energeticheskikh usloviiah Ukrainy* [A modern technological route for converter production of high-quality iron-carbon semi-finished products in Ukraine's raw material and energy environment]. *Metal and casting of Ukraine*, 28, 1, 30–37. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.30>. [in Russian]
4. Zhrazhevskii, A. D., Cherniatevych, A. G., Sushchenko, A. V., & Hritsenko, A. S. (2014). *Sostoianie i dalneishee sovershenstvovanie konstruktsii kislorodnykh furn v konverternykh tsekhakh Ukrainy* [Current status and further improvement of oxygen lances in converter shops of Ukraine]. *Metallurgical and mining industry*, 6, 20–30. [in Russian]
5. Venkata Lakshmi, M., & Chandra Mouli, K.V.V.N.R. (2017). *Study of oxygen blowing lance and it's drive mechanism in LD converters.* *International journal and magazine of engineering. Technology, management and research*, 4 (4), 53–56
6. Cherniatevych, A. G. (2014). *Napravleniia sovershenstvovania kombinirovannoi produktsii konverternoi vanny kislorodom i neitralnym gazom* [Directions for improving combined oxygen and neutral gas blowing of converter baths]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 28, 147–160
7. Cherniatevych, A. G., & Vakulchek, V. V. (2015). *O povyshenii effektivnosti verkhnei produktsii konverternoi vanny* [On improving the efficiency of converter bath top blowing]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 30, 130–147. [in Russian]
8. Sushchenko, A. V. (2009). *Sovershenstvovanie i optimizatsiia dutevykh rezhimov i ustroystv kislorodnykh konverterov* [Improvement and optimization of blast modes and devices of oxygen converters]. *Bulletin of the Azov State Technical University*, 19, 36–41. [in Russian]
9. Molloy, N. A. (1970). *Impinging jet flow in a two phase system: The basic flow pattern.* *Journal of the Iron and Steel Institute*, 208, 943–950.
10. Sato, S., Ando, M., Okada, J., Ueda, Y., & Iguchi, M. (2020). *Prediction of plunging depth induced by top lance gas blowing onto a low-melting-point metal bath.* *ISIJ International*, 60(8), 1675–1683. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-125>

11. Okhotskii, V. B. (2008). Top injection of the steel-smelting bath with deep penetration: A model. *Steel in Translation*, 38 (6), 424–428. <https://doi.org/10.3103/S0967091208060028>
12. Cao, L., Wang, Y., Liu, Q., & Feng, X. (2018). Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*, 58(4), 573–584. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-680>
13. Goncalves, F., Ribeiro, M., Correa, R., Silva, R., Braga, B., Maia, B., Tavares, R., Carvalho, D., & Schenk, J. (2021). Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 834–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.050>
15. Zhang, L., Qi, F., Liu, Z., Cheung, S.C.P., & Li, B. (2026). Investigation of droplet splashing behavior relevant to molten steel flow: a full-scale water model study using VOF–DPM and Eulerian wall film model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 57(3), 1568–1588. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03941-w>
16. Hwang, H. Y., & Irons, G. A. (2012). A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. *Metall. Mater. Trans.*, 43, 302–315. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>.
17. Odenthal, H. J., Emling, W. H., Kempken, J., & Schlüter, J. (2007). Advantageous numerical simulation of the converter blowing process. *Iron & Steel Technology*, 4(11), 71–89
18. Errson, M., & Tillander, A. (2018). Review on CFD simulation and modeling of decarburization processes. *Steel Research International*, 89(1), 1700108. <https://doi.org/10.1002/srin.201700108>
19. Samohvalov, S. Ye., & Kosuhina, O. S. (2009). Chiselni metody v rozrahunkah metalurgiinyh agregativ [Numerical methods in calculations of metallurgical units]. Dneprodzerzhinsk, publishing house of DSTU. [in Ukrainian]
20. Szekely, J., & Asai, S. (1974). Turbulent fluid flow phenomena in metals processing operations: Mathematical description of the fluid flow field in a bath caused by an impinging gas jet. *Metall. Trans.*, 5, 463–467. <https://doi.org/10.1007/BF02644115>
21. Cherniatevych, A. G., Siharev, Ye. M., & Zuev, O. I. (2002). Matematichna model hidrodinamichnyh protsesiv u bahatofaznomy seredovyschi v poroznyini konvertera pid chas produvki rozplavu metalu gazovymy strumeniamy z chastkovoiu peredacheu impulse na mezhi rozpodilu faz [Mathematical model of hydrodynamic processes in a multiphase medium in the converter cavity during purging of the metal melt by gas jets with partial momentum transfer at the boundary of zone distribution]. *Mathematical modeling*, 1(8), 77–80. [in Ukrainian]
22. Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). Computational methods for fluid dynamics. Springer Science & Business Media, Berlin.
23. Zucker, R. D., & Biblarz, O. (2002). Fundamentals of gas dynamics, 2nd ed., Wiley, Hoboken, NJ.
24. Bhattacharya, T., Zhan, L., & Chukwulebe, B. (2016). Design considerations for supersonic oxygen lances in a Basic oxygen furnace. Conference: SCANMET V at: Lulea, Sweden. 12-15 June, 2016.
25. Liu, F., Sun, D., Zhu, R., & Li, Y. (2019). Characteristics of flow field for supersonic oxygen multijets with various Laval nozzle structures. *Metall. Trans. B*, 50, 2362–2376. <https://doi.org/10.1007/S11663-019-01652-7>

26. Okhotskii, V. B. (1983). Structure of gas jets. *Steel in the USSR*, 13(11), 489–490
27. Kapustin, Ye. A., Lukhtura, F. I. (2001). Odnomernaia teoriia strui [One-dimensional theory of jets]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Technical Sciences*, 11, 243–249 [in Russian]
28. Rathakrishnan, E. (2019). *Applied Gas Dynamics*, 2nd Edition. Wiley.
29. Kruskopf, A. (2017). A 2D axisymmetric mixture multiphase model for bottom stirring in a BOF converter. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48(1), 619–631. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0856-x>.
30. Nguyen, A. V., & Evans, G. M. (2006). Computational fluid dynamics modelling of gas jets impinging onto liquid pools. *Applied Mathematical Modelling*, 30, 11, 1472–1484. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.015>
31. Lorstad, D., & Fuchs, L. (2004). High-order surface tension VOF-model for 3D bubble flows with high density ratio. *J. Comput. Phys.*, 200 (1), 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.04.001>
32. Welch, S. W. J., & Wilson, J. (2000). A volume of fluid based method for fluid flows with phase change. *J. Comput. Phys.*, 160(2), 662–682. <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6481>
33. Chernyatevich, A. G., Zarvin, E. Y., & Volvovich, M. I. (1975). Observation through a transparent wall of the behavior of a basic oxygen furnace bath during injection. *Steel USS*, 5, 79–81
34. Semykin, S. I., Golub, T. S., & Dudchenko, S. A. (2021). Direct observation of high-temperature areas of metal melt at oxygen converter blowing with low voltage application. *Sci. in nov.*, 17, 4, 44–54. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.044>
35. Barron, M. A., Medina, D. Y., & Reyes, J. (2021). Interaction between a liquid surface and an impinging gas jet. *World Journal of Engineering and Technology*, 9, 793–803. <https://doi.org/10.4236/wjet.2021.94055>
36. Lukhtura, F. I. (2018). O stepeni usvoyenia kisloroda metallicheskoj vannoi pri verhнем vдуve [On the degree of oxygen absorption by a metal bath during top injection into an LD converter]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Technical Sciences*, 36, 39–53 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142513>

T. S. Golub^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953

O. M. Minai¹, Ph. D (Tech.), ORCID 0000-0002-4180-0149

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine*

* *Corresponding author: isinasu.golubts@gmail.com*

MODERN METHODS OF STUDYING THE DISTRIBUTION OF FLOWS AND THEIR VELOCITIES IN THE LIQUID PHASE WHEN BLOWING THROUGH A LAVAL NOZZLE

Abstract. The oxygen-converter process of steel production is constantly developing, and each improvement requires research and development of operating moments in laboratory conditions at low basic costs. In this regard, numerical simulation methods are actively developing, for the implementation of which the most relevant and time-tested and various studies is the ANSYS FLUENT application program. It has high

performance and has wide capabilities for calculating hydro-gasdynamic phenomena. Using this program, a study was conducted on the formation and distribution of flows in the aqua environment and in molten hot metal under the action of a gas flow flowing from a Laval nozzle under conditions of blowing with a pressure twice the ambient pressure. A comprehensive validation of the results of numerical modeling was carried out with the involvement of physical low-temperature and high-temperature modeling, which showed a high degree of correspondence of the obtained results. According to the results of the calculation, it was found that the magnitude of the flow velocities in the liquid is an order of magnitude smaller than the initial magnitude of the gas flow velocity emerging from the Laval nozzle. The highest flow velocities in the liquid are concentrated in the central part of the bath under the crater, which is formed due to the action of the gas jet on the liquid surface. Under the conditions of water blowing, the depth of the crater and the area of distribution of the highest flow velocities were twice as large as under the conditions of cast iron blowing. It was noted that in the central part of the bath under the crater a flow was formed that counteracts the direction and influence of the gas flow, and under the conditions of the greatest immersion of the gas jet into the bath, several counter-directed vertical flows were formed, ending in vortex-like formations. Moreover, in a metal bath, the number of additional flows was greater. The obtained results of the numerical study, compared with the results of real physical modeling under similar conditions, have an important potential for replenishing the database on the features of the interaction of gas flows flowing out of the Laval nozzle at a blowing pressure twice the atmospheric pressure with an aqueous medium and liquid molten iron.

Key words: oxygen-converter process, top blowing, Laval nozzle, hydro-gasdynamic processes, numerical simulation.

For citation: Golub, T. S., & Minai, O. M. (2026). Modern methods for studying the distribution of flows and their velocities in the liquid phase when blowing through a Laval nozzle. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 433-453. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-026>

Рукопис надійшов до редакції / Received 09.02.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026