

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 3 (346), 8-20

<https://doi.org/10.15407/steelcast2026.03.008>

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

Т.С. Голуб¹, канд. техн. наук, ст. досл., ст. наук. співр. відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

Л.С. Молчанов¹, канд. техн. наук, ст. досл., зав. відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: metall729321@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

О.М. Мінай^{1,2}, доктор філософії, ст. наук. співр. відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі¹, голов. наук. співр.²,
e-mail: minayan1976@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4180-0149>

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

²Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» (Дніпро, Україна)

Чисельне дослідження особливостей формування газових струменів при продувці крізь складені сопла із різною часткою периферійної складової

Дослідження особливостей витікання газового струменя із сопел різної конструкції є важливою складовою сучасності промислової науки та техніки, адже газова продувка досить широко представлена у різних галузях, у тому числі металургійній практиці виплавки сталей. При цьому наразі набуває значної популярності чисельне дослідження шляхом CFD-моделювання (обчислювальної гідродинаміки) газо-гідродинамічних процесів із використанням програмного комплексу ANSYS Fluent, який дозволяє зі значною достовірністю швидко та за невеликих витрат отримати результати у широких діапазонах змінних умов для складних процесів продувки. Для металургійної галузі характерною є продувка з недорозширеним струменем задля підтримання стабільних умов роботи процесів, які вона супроводжує, й використання сопел різної конструкції відповідно до поставлених задач. В статті представлено результати CFD-моделювання особливостей витікання газового струменя зі складених сопел (сопла мають центральну циліндричну частину та периферійну кільцеву частину, яка розташована навколо центральної) із різною часткою периферійної кільцевої складової в діапазоні надлишкового тиску 200—600 кПа. Результати досліджень порівняні з результатами продувки крізь циліндричне сопло еквівалентного діаметра. Встановлено геометричні особливості формування газових струменів за умов збільшення периферійної складової та надлишкового тиску. Вказано переваги більшої частки периферійної кільцевої складової щодо величини числа Маха на виході з продувального сопла та довжини потенційного ядра струменя. Відповідно до результатів математичної статистичної обробки створено прогностичні залежності положення першого диска Маха та довжини потенційного ядра від показника недорозширення струменя та особливостей конструкції складених сопел, виражених у співвідношенні зовнішніх діаметрів та площин перетину периферійної та центральної складових, перевірка яких вказує на їх достатньо високу адекватність.

Ключові слова: продувка газом, недорозширений газовий струмінь, складене сопло, периферійна частка, газодинамічні процеси, чисельне моделювання, число Маха, CFD-моделювання.

Вступ. Продувку газом крізь сопла різної конструкції широко використовують у різних галузях техніки. Так, наприклад, у металургії, газові струмені організують перемішування металевих розплавів [1–3], що забезпечує стабільну температуру та склад по всьому розплаву, покращує кінетику металургійних реакцій [4–7], за рахунок покращеного контакту між розплавленим металом та шлаком прискорюються такі металургійні реакції, як дефосфорація та десульфурація, також газові струмені виносять дрібні частинки домішок — включення та розчинені гази. При електричному зварюванні газову продувку використовують для створення захисного середовища [8, 9]. У машинобудівній, авіаційній та ракетно-космічній галузях розпилювання та продувка газів крізь соплові елементи конструкцій є складовою роботи пневмогідрравлічних систем живлення та рушійних установок [10–13], які є головним джерелом рухомої сили у літальних апаратах. У лазерній різці продувка газом крізь сопло необхідна для захисту лінзи від бризок, видалення розплавленого металу, забезпечення рівномірності шва та охолодження матеріалу [14, 15]. Також продувка крізь сопло є обов'язковою складовою плазмової різки [16, 17] та багатьох інших процесів, де потрібно керування струменем, його прискорення й надання напрямку, створення захисного середовища чи активне безконтактне перемішування. У всіх випадках від роботи газових струменів, які витікають з сопел різної конструкції, залежать основні технологічні показники складних й дуже відповідальних процесів. Це зумовлює багаторічний інтерес науковців щодо дослідження особливостей витікання газових струменів з сопел задля оптимізації їх конструкції та розробки ефективних режимів їх роботи. На ранніх етапах такі дослідження були представлені в своїй більшості натурними фізичними моделюваннями з використанням різних методів та пристроїв й описом отриманих залежностей математичною мовою на базі теорії газо-гідродинаміки [18, 19] для можливості подальшого прогнозування роботи різних сопел при змінних умовах. З розвитком потенціалу обчислювальної техніки у науковців з'явилися ресурси для значно швидшого та менш ресурсоємного отримання прогнозованої інформації щодо особливостей параметрів витікання газових струменів крізь сопла різних конструкцій — CFD-моделювання (обчислювальна гідродинаміка). Основні переваги цього методу: можливість проведення детального аналізу топології когерентних структур струменя у будь-якій точці як у межах сопла, так і поза ним, включаючи розподіл тиску, швидкості, температури, щільності та концентрації компонентів, що неможливо зробити з такою точністю в експерименті; легко змінювати геометричні параметри сопла та швидко бачити вплив цих змін на ефективність струменя; безпечно вивчати процеси, які в реальності передбачають екстремальні умови роботи, як, наприклад, надзвукові швидкості чи високі температури у металургійних чи авіаційних процесах тощо. До того ж використан-

ня CFD-моделювання суттєво зменшує часові та матеріально-технічні витрати (за умов однократного придбання чи створення програмного забезпечення, яке використовується) на проведення дослідно-конструкторських та проектних робіт, що має значний вплив на конкурентоспроможність кінцевої продукції. Наразі найбільш поширеним програмним комплексом для проведення чисельних (CFD) розрахунків газо-гідродинамічних процесів є ANSYS Fluent, вирішувач якого побудований на основі методу контрольних об'ємів (Finite Volume Method) [20]. Відповідно до цього методу для проведення обчислення розрахункова область розбивається на багато дрібних контрольних об'ємів — комірок, у яких інтегруються рівняння руху середовища (рівняння Нав'є-Стокса), створюючи систему рівнянь для розв'язання чисельними методами. Для дослідження надзвукових газових струменів використовується вирішувач density-based та модель турбулентності k - ε RNG [20] — рівняння, які добре описують складні, швидкозмінні турбулентні струмені. Модель турбулентності k - ε RNG модифікує стандартну k - ε — модель, динамічно регулюючи турбулентну в'язкість та додаючи важливий виробничий член до рівняння ε , що дозволяє точно фіксувати швидкодеформовані, закручені струмені та струмені з низьким числом Рейнольдса. Вона є частиною підходу RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) — усереднений за Рейнольдсом коефіцієнт Нав'є-Стокса: набір усереднених за часом рівнянь, що використовуються для моделювання турбулентних струменів, який спрощує математичні розрахунки, розділяючи струмінь на середню (усереднену) складову та турбулентні коливання, що вимагає додаткових «моделей турбулентності» типу k - ε). Тобто вона математично усереднює ефекти турбулентності з часом, розв'язуючи задачу для двох основних змінних: k (кінетична енергія турбулентності) — енергія, що міститься в турбулентних обчисленнях за рівнянням [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(a_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

та ε (швидкість дисипації) — швидкість, з якою ця кінетична енергія турбулентності перетворюється на тепло відповідно до рівняння (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(a_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon. \quad (2)$$

У рівняннях (1), (2): ρ — густина газу, u_j — швидкість струменя, μ_{ef} — ефективна турбулентна в'язкість струменя, G_k — генерація кінетичної енергії турбулентності через градієнти середньої швидкості, G_b — генерація кінетичної енергії турбулентності внаслідок плавучості, Y_M — внесок флуктуаційної дилатації в стисливий турбулентності у загальну швидкість дисипації, a_k і a_ε — обернені ефективні числа Прандтля для k і ε відповідно, S_k і S_ε — визначені користувачем члени, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ — константи в

рівнянні (2) мають значення, отримані аналітично за допомогою теорії RNG.

Математична основа RNG на відміну від стандартної моделі $k-\varepsilon$, яка значною мірою спирається на чисто емпіричні константи, отримані з простих, повністю розвинених струменів, використовує статистичні методи для ретельної фільтрації рівнянь Нав'є-Стокса. Ця систематична процедура «виключення масштабу» виводить константи з фундаментальної фізики, що означає, що для її застосування до складних геометрій потрібно менше припущень. Основна математична відмінність полягає в рівнянні переносу для ε . Модель випадкового числа включає додатковий член R_ε , який зазвичай виражається як [21]:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\varepsilon R \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) c^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (3)$$

де η — відношення масштабів часу турбулентного та середнього деформаційного. Ця модифікація враховує взаємодію між турбулентністю та більшими градієнтами середньої деформації, значно покращуючи прогнози закручених струменів та струменів зі швидкими змінами швидкості деформації та дозволяє надійно інтегрувати турбулентну в'язкість через в'язкий підшар з кращою точністю при моделюванні струменя, який витікає зі складними елементами. Використовуючи методи групи повторної нормалізації, модель отримує більш фундаментальні константи. Також оскільки досліджувані струмені, а саме які використовуються у металургійній практиці, є високошвидкісними, до моделі турбулентності додають член дилатаційно-дисипаційної дії згідно з моделлю Саркара, щоб врахувати вплив стисливості на турбулентність [22, 23].

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми. Для процесів виробництва металу найпоширенішими типами сопел, якими обладнують верхні продувні фурми для продувки рідкого металевого розплаву, є сопла Лавалю або циліндричні сопла [24—26]. Для металургійних процесів такі сопла використовуються за умов недорозширення [27—29] з утворенням газових струменів, які мають бочкоподібну структуру та формують по чергові диски ущільнення — диски Маха. Недорозширені струмені використовуються для продування та рафінування розплавленого металу, оскільки вони забезпечують глибоке проникнення у ванну, стабілізують газовий струмінь вздовж осі та межу газ-рідина, зону так званого кратера взаємодії. До того ж внутрішній тиск у металургійних агрегатах динамічно змінюється протягом процесу продувки. Конструкція фурми для роботи в стані слабкого або помірного недорозширення гарантує, що струмінь не перейде в дуже нестабільний «перерозширений» стан, який може пошкодити продувну фурму за рахунок всмоктування металевих крапель у струмінь або спричинити серйозні експлуатаційні неефективності. На рис. 1 наведено приклад схеми формування недо-

розширеного газового струменя [27], на якому видно бочкоподібну структуру на початковій ділянці струменя — так званому потенційному ядрі, та принцип формування дисків Маха. Газовий струмінь, виходячи із сопла за умов тиску більшого за навколишній, розширюється, а його тиск падає, що створює умови для згинання межі струменя. Хвилі розрідження, які йдуть від краю сопла, через низький зовнішній тиск відбиваються від межі струменя й формують хвилі стиснення, які далі збираються разом, утворюючи косий стрибок ущільнення. Він виглядає як бічна стінка «бочки». Якщо недорозширення досить велике, косі стрибки не перетинаються на осі, а утворюють прямий стрибок ущільнення, який розміщений перпендикулярно струменя — диск Маха, в якому надзвуковий струмінь переходить у дозвуковий. За ним за інерцією газового струменя картина повторюється.

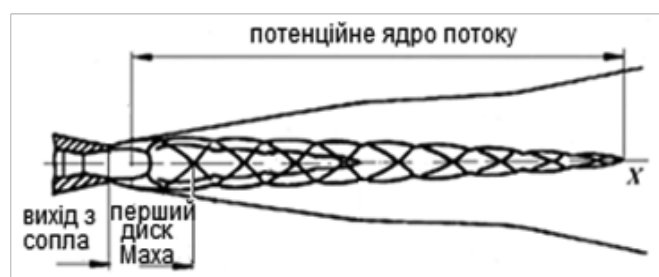


Рис. 1. Приклад схеми формування недорозширеного газового струменя

Важливими показниками газового струменя є величина та положення першого диска Маха, відстань між дисками Маха та довжина потенційного ядра струменя. Знання числа Маха на виході з сопла та в першій бочці є важливим для прогнозування поведінки газового струменя та змішування його з навколишнім середовищем [30—32]. Положення першого диска Маха також дозволяє оцінити параметри розширення надзвукового струменя. Знання цього показника дозволяє прогнозувати рівень акустичного шуму та оптимізувати робочі процеси з використанням сопла. Наприклад, занадто близьке розташування першого диска до сопла може викликати небезпечні навантаження на сопло. Щодо показника відстані між дисками Маха, його величина у сильно недорозширених надзвукових газових струменях визначає швидкість перемішування струменя з навколишнім середовищем та визначає розміри турбулентних зсувних шарів. Відповідно до відомостей різних авторів [33, 34], менша відстань між дисками Маха збільшує швидкість перемішування, оскільки сприяє швидкому уповільненню струменя, інтенсивному розсіюванню вихорів та ширшому розтіканню струменя. Більша відстань між дисками свідчить про вдовжене потенційне ядро та можливість струменя підтримувати свій імпульс на більшій осевій відстані з меншим боковим розтіканням. Це призводить до нижчої загальної швидкості змішування в ближньому полі. Вказані параметри газового струменя мають

тісний зв'язок із показником градієнта тиску на вході та виході з сопла, так званого показника недорозширення струменя (NPR) [33—35], який, у свою чергу, за величини вище 1,89 визначає, що струмінь набуває надзвукового характеру й є недорозширеним:

$$NPR = \frac{P_0}{P_a} \geq \frac{(\gamma + 1)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}{2} \geq 1,89, \quad (4)$$

де P_0 та P_a — тиск газу у соплі та атмосферний тиск, γ — адіабатична експонента, що для двоатомного газу дорівнює 1,4.

Для вирішення спеціальних прикладних задач в металургійній практиці можливо використання інших відмінних від вказаних вище конструкцій сопел. Наприклад, для поліпшення проникних властивостей газових струменів у рідку металеву ванну та покращення обмінних процесів можуть бути використані складені сопла [36]. Такі сопла мають складну конструкцію типу труба в трубі (мають периферійну кільцеву та круглу центральну складові) й по обох складових яких подається однаковий продувний газ. В роботі було **поставлено задачу** чисельного дослідження впливу співвідношення периферійної та центральної складової складених сопел на основні показники газового струменя. Досліджено було продувку газом у вільне середовище крізь складені сопла із периферійною часткою 25, 50 та 75 % по відношенню до загальної площі сопла (діаметри периферійної кільцевої частини та внутрішньої частини: $3,5 \cdot 10^{-3} \times 3,1 \cdot 10^{-3}$ м, $2,8 \cdot 10^{-3}$ м; $3,5 \cdot 10^{-3} \times 2,6 \cdot 10^{-3}$ м, $2,2 \cdot 10^{-3}$ м; $3,5 \cdot 10^{-3} \times 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, $1,6 \cdot 10^{-3}$ м). Надалі варіанти 1—3. Зовнішній діаметр сопла та загальна площа сопла були однаковими для всіх варіантів. Складені сопла мали загальний циліндричний вигляд, тому для порівняння було обрано циліндричне сопло еквівалентного дослідним соплам діаметра $3,2 \cdot 10^{-3}$ м — надалі варіант 4.

Матеріали та методи. Дослідження проведене методом CFD-моделювання за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent із зазначеними вище

показниками вирішувача. Тиск на вході в сопло було досліджено в діапазоні 200—600 кПа (відповідно NPR складав 2—6 та струмені були середньо недорозширені). Для обчислення було обрано сітку із кількістю комірок ~700 тис. із розміром комірки $5 \cdot 10^{-6}$ м відповідно до результатів перевірки незалежності результатів від ступеня ущільнення сітки (за умов порівняння трьох варіантів дискретизації: ~350 тис., ~700 тис. та ~1400 тис. комірок із відмінністю результатів зміни швидкості в ядрі струменя в ключових точках на рівні 2 %, як баланс часу обчислення та точності результату). Для того, щоб правильно розв'язати ефекти стінки та ударні хвилі неструктурована сітка мала ущільнення поблизу стінок сопла та в областях, які мають високий градієнт, наприклад, вихід сопла та зона диска Маха із мінімальним розміром комірок близько $5 \cdot 10^{-7}$ м. Збіжність розрахунку встановлювали за рівністю показника «Залишки» для всіх рівнянь (крім енергетичного) $1 \cdot 10^{-4}$, а для енергетичного $1 \cdot 10^{-6}$ [20]. Додатково контролювався баланс маси між входом та виходом із різницею менше 0,5 %. Усі результати, представлені в роботі, відповідають цим критеріям збіжності, що свідчить про адекватність числової схеми та стабільність рішення.

Валідація отриманих результатів розрахунку проводилася шляхом порівняння з фізичним експериментом вимірювання загального тиску за допомогою мікротрубки Піто, методику використання якої описано в роботі [37]. Мікротрубка Піто з діаметрами $1,1 \cdot 10^{-3}$ м $\times$ $0,8 \cdot 10^{-3}$ м була розміщена вздовж центральної поздовжньої осі кожного дослідженого сопла на фіксованій відстані у калібрах еквівалентного сопла для реєстрації загального тиску при надлишковому тиску у соплі 200 кПа. Відстань для фактичного виміру було обрано більше 5 калібрів, що пов'язано зі значним впливом засобу вимірювання на струмінь на близьких до зрізу сопла відстанях. Для вимірювання тиску використовувався електронний цифровий манометр DM5002BU2 з діапазоном вимірювання 0—16 кПа та точністю вимірювання 0,1 кПа. На рис. 2 наведено порівняння результатів вимірювання з роз-

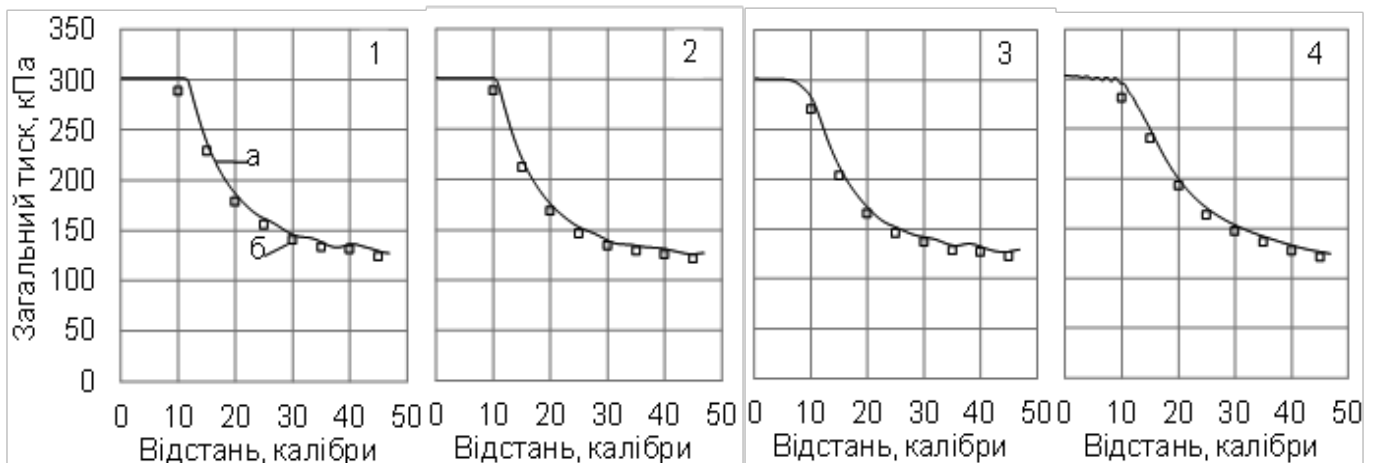


Рис. 2. Розподіл загального тиску у струмені, що витікає з різних сопел: 1—3 — сопла складеного типу з периферійною часткою 25 %, 50 % та 75 % відповідно, 4 — циліндричне сопло; а — розраховані дані, б — фактично виміряні

рахунковими даними.

Відповідно до отриманих результатів, розрахункові дані мають схожий характер зміни залежно від відстані від сопла та дещо вищі значення: для циліндричного сопла відхилення складає 3,5—4,1 %; для складених сопел — 3,8—4,7 %. Це свідчить про адекватність вибраних параметрів моделювання та прийнятність розрахункової моделі.

Результати дослідження та їх обговорення.

На рис. 3 наведено приклад розподілу числа Маха за довжиною газових струменів за умов формування недорозширеного струменя за надлишкового тиску 300 кПа (NPR 3) (представлені верхні половинки отриманих нефограм). Газові струмені, які витікають

зі складених сопел із різним співвідношенням периферійної частки, формуються за схожим принципом, як і струмінь, що витікає з циліндричного сопла: після виходу з сопла основний струмінь розширюється з формуванням в центрі струменя потенційного ядра з ущільненнями, які мають бочкоподібну форму. В центрі кожної бочки показники числа Маха вищі, ніж на периферії та між ними (вищі показники числа Маха відповідають темнішим кольорам в центрі струменя). За межами бочок та поміж ними число Маха має низькі значення. Відзначено, що за 25 % периферійної частки загальний малюнок розподілу числа Маха у більшій мірі схожий на той, що отриманий при продувці крізь циліндричне соп-

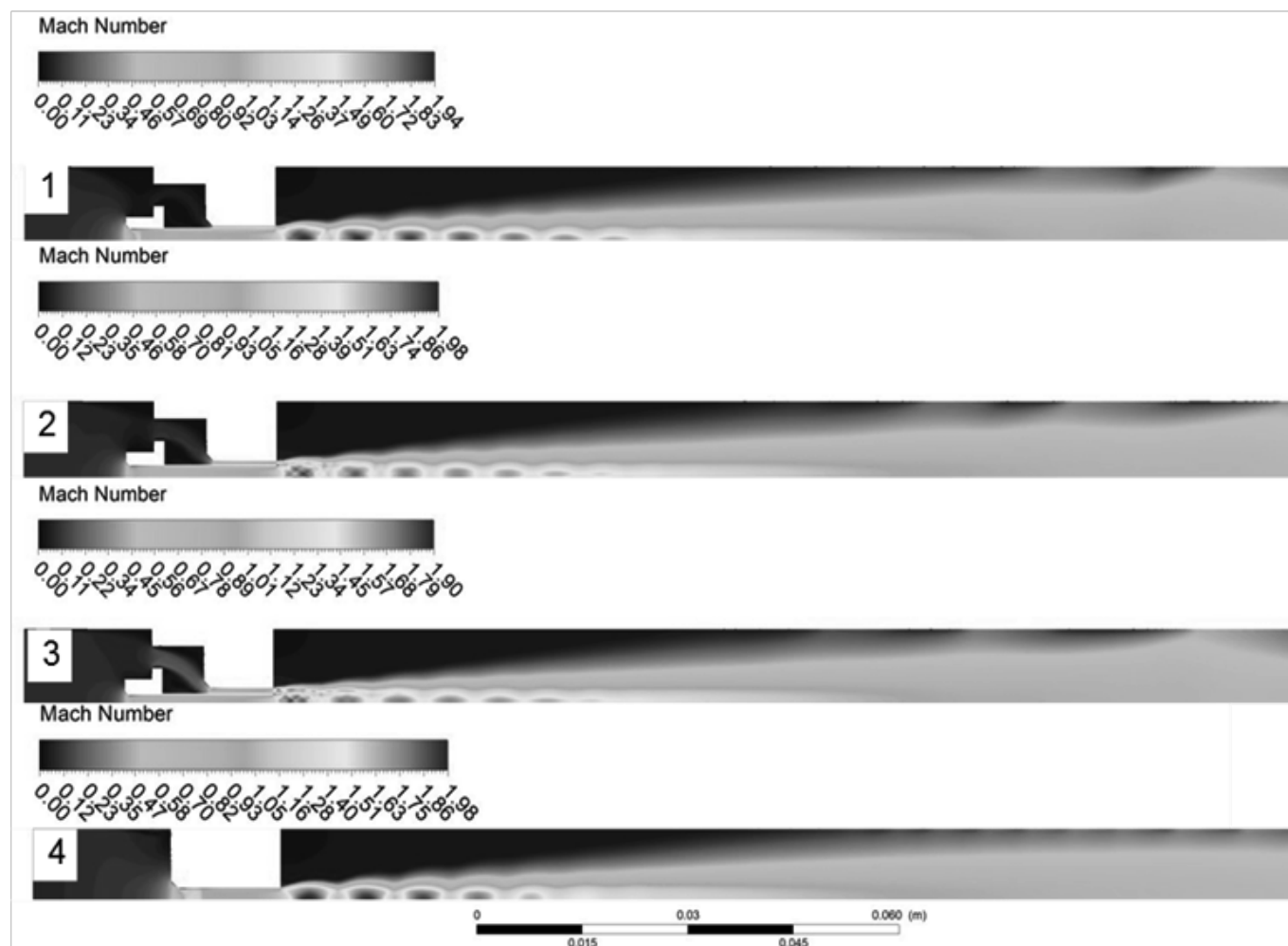


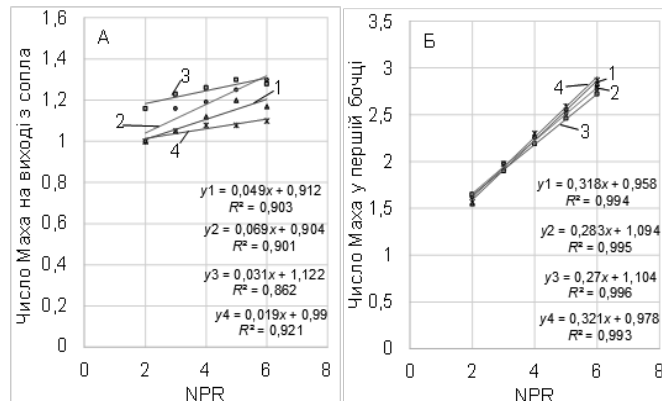
Рис. 3. Приклад розподілу числа Маха за умов NPR 3 за довжиною струменя, що витікає з різних сопел: 1—3 — сопла складеного типу з периферійною часткою 25 %, 50 % та 75 % відповідно, 4 — циліндричне сопло (градієнт кольору на рис. за межами струменя відповідає показнику 0, а збільшення інтенсивності кольору в центрі потоку відповідає збільшенню показника за шкалою)

ло: в центрі кожної бочки одне ущільнення з великим числом Маха, які лінійно повторюються вздовж осі струменя (див. рис. 3 варіанти 1 та 4). При збільшенні частки периферійної складової в центрі кожної бочки утворюються декілька ущільнень з великим числом Маха, які розміщені нелінійно за площиною бочки (див. рис. 3, варіанти 2 та 3 в центрі бочок декілька темних ділянок). Це вказує на складний характер взаємодії периферійної та центральної складових

струменя за умов більше 50 % периферійної частки. За 75 % периферійної частки навіть спостерігалися додаткові темні ущільнення вздовж периферійної частини струменя. Аналогічні ще більш чіткі картини розподілу величин числа Маха за довжиною струменів за умов продувки крізь сопла дослідної конструкції спостерігалися при аналізі нефограм при більших NPR.

Відзначено, що за дослідних умов число Маха

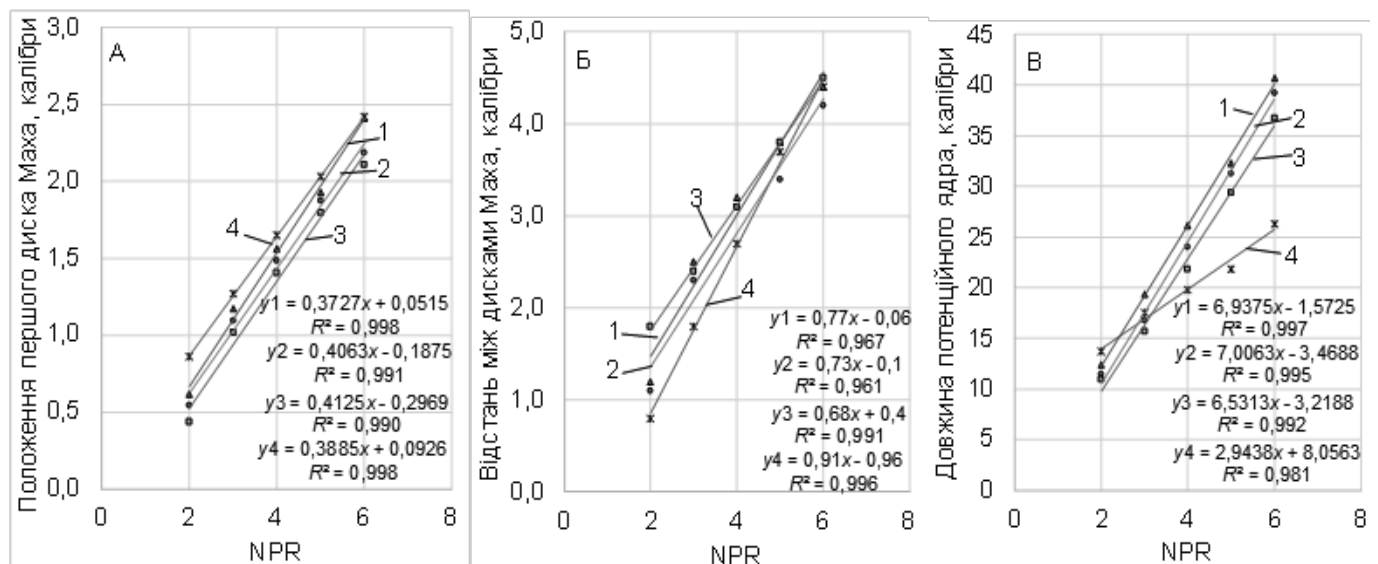
на виході зі всіх дослідних сопел було вище 1, що відповідає формуванню надзвукового недорозширеного струменя. Збільшення продувального надлишкового тиску (й показника NPR відповідно) сприяло



збільшенню показника числа Маха на виході з сопла за лінійною залежністю (рис. 4). Відзначено, що на виході з сопла найменший показник числа Маха зафіксовано за умов продувки крізь циліндричне сопло — на рівні 1.

Продувка крізь складені сопла створює умови для збільшення числа Маха на виході особливо при зростанні NPR. Причому, чим більша периферійна частка, тим більший був показник числа Маха (для варіанта 1 цей показник був на 3,1—6,2 % більший за показник варіанта 4, а для варіанта 3 — на 16,0—20,3 % більший). Цікавим є той факт, що далі за довжиною струменя у першій бочці величина числа Маха була вищою для всіх дослідних сопел за число Маха на виході при збереженні загальних тенденцій залежності від продувального тиску. За умов продувки крізь всі дослідні сопла показники мали близькі значення до NPR 4, а за більших значень NPR мали відхилення на рівні 2,1—5,3 %.

Аналіз показників положення першого диска Маха, відстані між дисками Маха та довжини потенційного ядра струменів (рис. 5) показав також схожу лінійну



залежність зростання показників від надлишкового тиску (виражено у показнику NPR) для всіх дослідних варіантів продувних сопел.

Завдяки сумісному впливу струменів, які витікають зі складених сопел, відстань до першого диска Маха відмічена меншою у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло за однакових умов продувки. Відзначено, що чим більша периферійна частка, тим менша відстань до першого диска Маха зі зменшенням різниці при зростанні NPR (різниця у порівнянні з варіантом 4 для варіанта 1 від 27,9 % при NPR 2 й до 0,5 % при NPR 6; для варіанта 2 від 36,1 % при NPR 2 й до 9,7 % при NPR 6; для варіанта 3 від 49,1 % при NPR 2 й до 12,9 % при NPR 6).

Щодо відстані між дисками Маха, за результатами

обчислень (рис. 5, Б), для умов продувки з величиною NPR до 4 найменший показник зафіксований для варіанта 4, а найбільший для варіанта 3 (у 2,50—1,15 разів у порівнянні з варіантом 4 проти 1,38—1,15 та 1,50—1,15 раз для варіантів 1 та 2). При більшому NPR результати для всіх варіантів зближуються. При цьому слід відзначити, що для складених сопел довжина потенційного ядра за умов NPR 2 була нижче за цей показник для варіанта 4. А за вищих показників NPR довжина потенційного ядра для варіанта 4 була найменшою, й для складених сопел збільшувалася зі зменшенням периферійної частки за однакових умов продувки (наприклад, для NPR 4 для варіанта 4 у 1,1 рази більший, а для варіанта 1 показник у 1,32 рази більший за варіант 4).

Можна зробити висновок, що за всіх однакових продувних умов та однакової прохідної площі перетину сопел, складені сопла відрізняються від циліндричного кращими умовами у формуванні властивостей газового струменя з довшим потенційним ядром. При цьому у формуванні геометрії та потенційних можливостей струменя (які виражаються у числі Маха) першорядну роль відіграє частка периферійної частини. При її збільшенні струмінь стає складнішим за будовою, набуває можливості розвивати значні показники числа Маха.

Відповідно до результатів різних дослідників [31, 32] розташування першого диска Маха (X_{MD}) прямо пропорційне вихідному діаметру сопла (D_e) та квадратному кореню з відношення між надлишковим тиском в соплі (P_0) та атмосферним тиском навколишнього середовища (P_a). Найбільш розповсюдженим у використанні є емпіричне співвідношення Ашкенаса-Шермана:

$$\frac{X_{MD}}{D_e} = A \sqrt{\frac{P_0}{P_a}} = A \sqrt{NPR}, \quad (5)$$

де A — константа, яка для круглих сопел має величину 0,65—0,67 [31].

Шляхом математичної статистичної обробки для умов продувки крізь складені сопла також були розраховані залежності положення першого диска Маха від показників продувки з урахуванням особливостей конфігурації сопел. Простежені вище залежності положення першого диска Маха від показника тиску NPR вказали важливу його роль. Також за результатами досліджень було визначено важливість показника, який вказує на співвідношення складових частин сопла (який буде представлено співвідношенням зовнішніх діаметрів центральної складової ($d_{ц.зovh}$) та периферійної складової ($d_{п.зovh}$)). Рівняння має загальний вигляд:

$$\frac{X_{MD}}{D_e} = K_1 \sqrt{NPR} \frac{d_{ц.зovh}}{d_{п.зovh}} \ln NPR, \quad (6)$$

де значення константи K_1 для кожного типу досліджених сопел має свою величину: для 25 % периферійної складової — 0,70; для 50 % периферійної складової — 0,80; для 75 % периферійної складової — 1,09, з величиною коефіцієнта кореляції (R^2) для 25 % периферійної складової 0,9871; для 50 % периферійної складової — 0,9977; для 75 % периферійної складової — 0,9983.

Порівняння фактично вимірних даних із розрахунками за запропонованим рівнянням (рис. 6) показали достатньо високі показники збіжності з відхиленням для 25 % периферійної складової на рівні 2,95; для 50 % периферійної складової — 4,01; для 75 % периферійної складової — 1,98. Це свідчить про адекватність запропонованого рівняння.

Також шляхом математичної статистичної оброб-

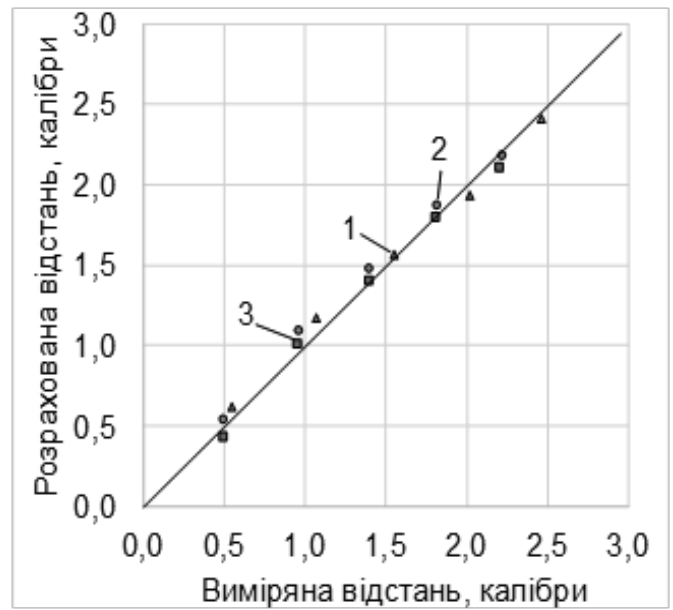


Рис. 6. Порівняння результатів обчислення за запропонованим рівнянням та фактично вимірних відстаней до першого диска Маха, 1—3 — продувка крізь складені сопла з периферійною часткою 25, 50 та 75 %

ки були отримані залежності довжини потенційного ядра газового струменя за умов продувки крізь складені сопла різного співвідношення складових. Загалом, відповідно до результатів досліджень різних авторів, цей показник має залежність від діаметра продувального сопла (D_e), співвідношення надлишкового та атмосферного тисків та числа Маха [38]. Загальноприйнятої однієї формули розрахунку не встановлено, й кожен автор розробляє відповідно до своїх умов адекватне рівняння. Керуючими факторами відповідно до статистичного аналізу були обрані співвідношення тисків, число Маха та співвідношення площин периферійної частини до центральної частини складених сопел, виражені через діаметри складових. Загальне рівняння довжини ядра (L/D_e) має вигляд:

$$\frac{L}{D_e} = K_2 \sqrt{NPR} \frac{D_1^2 - D_2^2}{d^2} \ln M, \quad (7)$$

де D_1 та D_2 є зовнішній та внутрішній діаметри периферійної складової, d — діаметр центральної складової, M — число Маха у першій бочці та K_2 — константа, яка для 25 % периферійної складової складає 53,38; для 50 % периферійної складової — 14,82; для 75 % периферійної складової — 5,01 із величиною коефіцієнта кореляції (R^2) для 25 % периферійної складової 0,9934; для 50 % периферійної складової — 0,9993; для 75 % периферійної складової — 0,9994. Порівняння фактично вимірних даних із розрахунками за запропонованим рівнянням (рис. 7) показали достатньо високі показники збіжності з відхиленням для 25 % периферійної складової на рівні 3,61; для 50 % периферійної складової — 0,52; для 75 % периферійної складової — 0,98. Це також свідчить

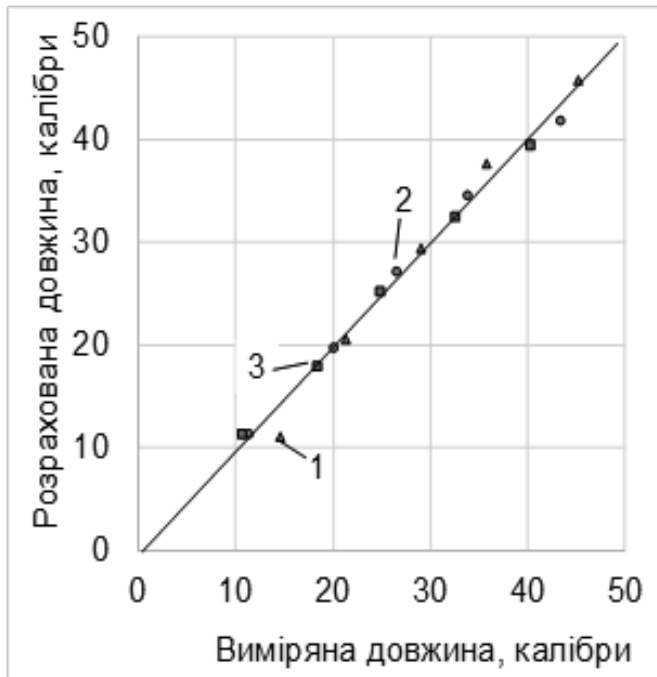


Рис. 7. Порівняння результатів обчислення за запропонованим рівнянням та фактично виміряних довжин ядра, 1—3 — продувка крізь складені сопла з периферійною часткою 25, 50 та 75 %

шовану навколо циліндричної центральної частини, із різним співвідношенням периферійної частини до загальної прохідної площини у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло, дозволило встановити особливості дії периферійної частини струменя на його формування:

- після виходу, струмінь розширюється, набуває структури, подібної до струменя з циліндричного сопла із почерговим формуванням бочок та дисків Маха вздовж центральної осі;

- при периферійній частці більше 50 % структура струменя складніша за струмінь з циліндричного сопла, із дрібними чисельними ущільненнями у кожній бочці, які стають чіткішими при зростанні периферійної частки;

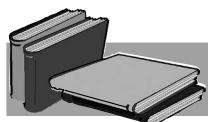
- при збільшенні периферійної частки число Маха на виході зростає, його положення стає ближчим до зрізу сопла, а довжина потенційного ядра зменшується при загальних більших показниках ніж за умов продувки крізь циліндричне сопло.

За результатами математичної статистичної обробки було отримано залежності положення першого диска Маха та довжини потенційного ядра від показників продувки (надлишкового тиску) та особливостей конструкції складених сопел, перевірка яких вказує на їх достатньо високу адекватність.

про високу адекватність запропонованого рівняння.

Висновки

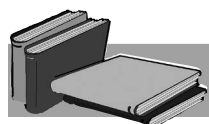
Проведене CFD-моделювання процесу витікання газового струменя зі складених сопел, що представляють собою периферійну кільцеву частину, розта-



ЛІТЕРАТУРА

1. Asahara N., Naito K., Kitagawa I., Matsuo M., Kumakura M., Iwasaki M. Fundamental Study on Interaction between Top Blown Jet and Liquid Bath. *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. Iss. 5. P. 587—594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>
2. Smirnov A.N., Sharandin K.N., Lebedev E.N. Physical simulation of metal mixing in a converter with hybrid injection. *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. P. 796—799. <https://doi.org/10.3103/S0967091210090032>
3. Wang Zh., Chen S., Wu C., Chen N., Li J., Liu Q. Effect of bottom stirring on bath mixing and transfer behavior during scrap melting in BOF steelmaking: A review. *High Temperature Materials and Processes*. 2024. Vol. 43. Iss. 1. Art. 20220322. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0322>
4. Shukla A.K., Deo B., Millman S., Snoeijer B., Overbosch A., Kapilashrami A. An Insight into the Mechanism and Kinetics of Reactions in BOF Steelmaking: Theory vs Practice. *Steel Research International*. 2010. Vol. 81. Iss. 11. P. 940—948. <https://doi.org/10.1002/srin.201000123>
5. Тімошенко С.М., Смірнов О.М., Нємцев Е.М. Чисельні дослідження кінетики десульфурації сталі при пневматичному перемішуванні. *Метал та луття України*. 2023. Т. 31. № 4(335). С. 18—24. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.02>
6. Ek M., Wu L., Valentin P., Sichen D. Effect of Inert Gas Flow Rate on Homogenization and Inclusion Removal in a Gas Stirred Ladle. *Steel Research International*. 2010. Vol. 81. Iss. 12. P. 1056—1063. <https://doi.org/10.1002/srin.201000102>
7. Michalek K., Tkadlečková M., Socha L., Gryc K., Saternus M., Pieprzyca J., Merder T. Physical modelling of degassing process by blowing of inert gas. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63(2). P. 987—992. <https://doi.org/10.24425/122432>
8. Bergquist E.-L., Huhtala T., Karlsson L. The effect of PURGING GAS on 308L TIG root pass FERRITE CONTENT. *Welding in the World*. 2011. Vol. 55. P. 57—64. <https://doi.org/10.1007/BF03321287>
9. Novianto E., Iswanto P.T., Mudijana M. The effects of welding current and purging gas on mechanical properties and microstructure of tungsten inert gas welded aluminum alloy 5083 H116. Proceedings of the 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC 2018), April 18, 2018, Bandung, Indonesia. Vol. 197. Art. 12007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819712007>
10. Barigozzi G., Abdeh H., Rouina S., Franchina N. The Aero-Thermal Performance of Purge Flow and Discrete Holes Film Cooling of Rotor Blade Platform in Modern High Pressure Gas Turbines: A Review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2022. Vol. 7. Iss. 3. Art. 22. <https://doi.org/10.3390/ijtp7030022>
11. Walker A.D., Koli B., Beecroft P.A. Influence of Purge Flow Swirl at Exit to the High-Pressure Compressor on OGV/Pre-Diffuser and Combustion System Aerodynamics. *ASME. Journal of Turbomachinery*. 2019. Vol. 141. Iss. 9. Art. 091009. <https://doi.org/10.1115/1.4043781>
12. Balz R., Bernardasci G., Rotz B. von, Sedarsky D. Influence of nozzle geometry on spray and combustion characteristics related to large two-stroke engine fuel injection system. *Fuel*. 2021. Vol. 294. Art. 120455. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120455>
13. Villarreal-Valderrama F., Zambrano-Robledo P., Hernandez-Alcantara D., Amezcua-Brooks L. Turbojet Thrust Augmentation through a Variable Exhaust Nozzle with Active Disturbance Rejection Control. *Aerospace*. 2021. Vol. 8. Iss. 10. Art. 293. <https://doi.org/10.3390/aerospace8100293>
14. ElNeiri M.H., Dahab A.S.A.H., Abdulaziz A.M., Abdelkhany K.M. Laser drilling: reviewing the effect of purging system and formation parameters. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023. Vol. 70. Art. 98. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00260-2>
15. Riveiro A., Quintero F., Boutinguiza M., Del Val J., Comesaña R., Lusquiños F., Pou J. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 1. Art. 157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
16. Chabert S., Gonzalez J.-J., Fretton P. Cutting and Shield Gases Pressure Effects on Plasma Cutting Quality. *Welding Journal*. 2024. Vol. 103(03). P. 75—84. <https://doi.org/10.29391/2024.103.007>
17. Naik D.K., Maity K. Experimental analysis of the effect of gas flow rate and nature on plasma arc cutting of hardox-400. *Welding in the World*. 2019. Vol. 64. P. 345—352. <https://doi.org/10.1007/S40194-019-00836-8>
18. Adamson T.C.Jr., Nicholls J.A. On the Structure of Jets from Highly Underexpanded Nozzles into Still Air. *Aerospace Sciences Archive*. 1959. Vol. 26. No. 1. P. 16—24. <https://doi.org/10.2514/8.7912>
19. Shapiro A.H. The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. Vol. 1. The Ronald Press Company, 1953. 541 p.
20. ANSYS 19.1 Help Viewer. ANSYS Documentation. Fluent. Theory Guide. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html (дата звернення: 10.07.2026).
21. ANSYS. 4.4.2 RNG k-epsilon Model. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node59.htm> (дата звернення: 10.07.2026).
22. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries Inc. 1993. P. 239—292.
23. Sarkar S., Balakrishnan L. Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer. ICASE Report 90-18NASA CR 182002. 1990.

24. Liu F., Sun D., Zhu R., Li Y. Characteristics of Flow Field for Supersonic Oxygen Multijets with Various Laval Nozzle Structures. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019. Vol. 50. P. 2362—2376. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01652-7>
25. Zhang Z., Yi B., Tan Zh. Numerical Simulation of Flow Field in the Laval Nozzle Based on Euler Equation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Art. 012089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012089>
26. Kassem F.-M. Investigation of the effect of different throat diameters on the flow characteristics of a sonic nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 0(0). <https://doi.org/10.1177/09544089251367241>
27. Лухтура Ф.И. Исследование параметров сверхзвуковых нерасчетных струй газа. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 30. Т. 1. С. 192—202.
28. Odenthal H.-J., Grygorov P., Reifferscheid M., Schlüter J. Advanced blowing and stirring conditions in the BOF process. *Proceedings of the AISTech — 2013. The Iron & Steel Technology Conference and Exposition*, 6—9 May 2013, Pittsburgh, PA, USA. P. 897—909.
29. Duronio F., Villante C., De Vita A. Under-Expanded Jets in Advanced Propulsion Systems — A Review of Latest Theoretical and Experimental Research Activities. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 18. Art. 6471. <https://doi.org/10.3390/en16186471>
30. Muraoka R., Hiejima T. Onset conditions for Mach disk formation in underexpanded jet flows. *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. Iss. 11. Art. 116125. <https://doi.org/10.1063/5.0122861>
31. Franquet E., Perrier V., Gibout S., Bruel P. Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. Vol. 77. P. 25—53. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.06.006>
32. Lau J.C., Morris P.J., Fisher M.J. Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter. *Journal of Fluid Mechanics*. 1979. Vol. 93. Iss. 1. P. 1—27. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001750>
33. Alam M.M.A., Mamun M., Hatsuse Y., Islam M.K., Saadi M.M.U., Takao M. Mixing Characteristics of Supersonic Jets Injected into a Pressurized Gas Environment. *Applied Sciences*, 2026. Vol. 16. Iss. 12. Art. 6190. <https://doi.org/10.3390/app16126190>
34. Soulopoulos N., Hardalupas Y., Taylor A.M.K.P. Mixing and scalar dissipation rate statistics in a starting gas jet. *Physics of Fluids*. 2015. Vol. 27. Iss. 12. Art. 125103. <https://doi.org/10.1063/1.4935233>
35. Krause E. *Fluid Mechanics With Problems and Solutions, and an Aerodynamic Laboratory*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. 2025. 364 p.
36. 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. 4. P. 79—92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>
37. Barker M. On the use of very small pitot-tubes for measuring wind velocity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1922. Vol. 101. Iss. 712. P. 435—445. <https://doi.org/10.1098/rspa.1922.0055>
38. Otobe Y., Kashimura H., Matsuo S., Setoguchi T., Kim H.-D. Influence of nozzle geometry on the neare-field structure of a highly underexpanded sonic jet. *Journal of Fluids and Structures*. 2008. Vol. 24. Iss. 2. P. 281—293. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.07.003>



REFERENCES

1. Asahara, N., Naito, K., Kitagawa, I., Matsuo, M., Kumakura, M., & Iwasaki, M. (2011). Fundamental Study on Interaction between Top Blown Jet and Liquid Bath. *Steel Research International*, 82(5), 587-594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>
2. Smirnov, A. N., Sharandin, K. N. & Lebedev, E. N. (2010). Physical simulation of metal mixing in a converter with hybrid injection. *Steel in Translation*, 40, 796-799. <https://doi.org/10.3103/S0967091210090032>
3. Wang, Zh., Chen, S., Wu, C., Chen, N., Li, J., & Liu, Q. (2024). Effect of bottom stirring on bath mixing and transfer behavior during scrap melting in BOF steelmaking: A review. *High Temperature Materials and Processes*, 43(1). 20220322. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0322>
4. Shukla, A. K., Deo, B., Millman, S., Snoeijer, B., Overbosch, A., & Kapilashrami, A. (2010). An Insight into the Mechanism and Kinetics of Reactions in BOF Steelmaking: Theory vs Practice. *Steel Research International*, 81(11), 940-948. <https://doi.org/10.1002/srin.201000123>
5. Timoshenko, S. M., Smirnov, O. M., & Nemtsev, E. M. (2023). Numerical studies of the kinetics of steel desulfurization under pneumatic mixing. *Metal and Casting of Ukraine*, 31(4(335)), 18-24. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.02> [in Ukrainian].
6. Ek, M., Wu, L., Valentin, P., & Sichen, D. (2010). Effect of Inert Gas Flow Rate on Homogenization and Inclusion Removal in a Gas Stirred Ladle. *Steel Research International*, 81(12), 1056-1063. <https://doi.org/10.1002/srin.201000102>
7. Michalek, K., Tkadlečková, M., Socha, L., Gryc, K., Saternus, M., Pieprzyca, J., & Merder, T. (2018). Physical modelling of degassing process by blowing of inert gas. *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(2), 987-992. <https://doi.org/10.24425/122432>
8. Bergquist, E-L., Huhtala, T., & Karlsson, L. (2011). The effect of PURGING GAS on 308L TIG root pass FERRITE CONTENT. *Welding in the World*, 55, 57-64. <https://doi.org/10.1007/BF03321287>
9. Novianto, E., Iswanto, P. T., & Mudijana, M. (2018). The effects of welding current and purging gas on mechanical properties and microstructure of tungsten inert gas welded aluminum alloy 5083 H116. Proceedings of the 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC 2018), April 18, 2018, Bandung, Indonesia, vol. 197, 12007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819712007>
10. Barigozzi, G., Abdeh, H., Rouina, S., & Franchina, N. (2022). The Aero-Thermal Performance of Purge Flow and Discrete Holes Film Cooling of Rotor Blade Platform in Modern High Pressure Gas Turbines: A Review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 7(3), art. 22. <https://doi.org/10.3390/ijtp7030022>
11. Walker, A. D., Koli, B., & Beecroft, P. A. (2019). Influence of Purge Flow Swirl at Exit to the High-Pressure Compressor on OGV/Pre-Diffuser and Combustion System Aerodynamics. ASME. *Journal of Turbomachinery*, 141(9), 091009. <https://doi.org/10.1115/1.4043781>
12. Balz, R., Bernardasci, G., Rotz, B. von, & Sedarsky, D. (2021). Influence of nozzle geometry on spray and combustion characteristics related to large two-stroke engine fuel injection system. *Fuel*, 294, 120455. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120455>
13. Villarreal-Valderrama, F., Zambrano-Robledo, P., Hernandez-Alcantara, D., & Amezcua-Brooks, L. (2021). Turbojet Thrust Augmentation through a Variable Exhaust Nozzle with Active Disturbance Rejection Control. *Aerospace*, 8(10), art. 293. <https://doi.org/10.3390/aerospace8100293>
14. ElNeiri, M. H., Dahab, A. S. A. H., Abdulaziz, A. M., & Abdelkhany, K. M. (2023). Laser drilling: reviewing the effect of purging system and formation parameters. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70, art. 98. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00260-2>
15. Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., Del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, 12(1), art. 157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
16. Chabert, S, Gonzalez, J.-J., & Fretton, P. (2024). Cutting and Shield Gases Pressure Effects on Plasma Cutting Quality. *Welding Journal*, 103(03), 75-84. <https://doi.org/10.29391/2024.103.007>
17. Naik, D. K., & Maity, K. (2019). Experimental analysis of the effect of gas flow rate and nature on plasma arc cutting of hardox-400. *Welding in the World*, 64, 345-352. <https://doi.org/10.1007/S40194-019-00836-8>
18. Adamson, T. C. Jr., & Nicholls, J. A. (1959). On the Structure of Jets from Highly Underexpanded Nozzles into Still Air. *Aerospace Sciences Archive*, 26(1), 16-24. <https://doi.org/10.2514/8.7912>
19. Shapiro, A. H. (1953). The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, vol. 1. The Ronald Press Company.
20. ANSYS 19.1 Help Viewer. ANSYS Documentation. Fluent. Theory Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html
21. ANSYS. 4.4.2 RNG k-epsilon Model. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node59.htm>
22. Wilcox, D. C. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., 239-292.

23. Sarkar, S., & Balakrishnan, L. (1990). Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer. ICASE Report 90-18NASA CR 182002.
24. Liu, F., Sun, D., Zhu, R., & Li, Y. (2019). Characteristics of Flow Field for Supersonic Oxygen Multijets with Various Laval Nozzle Structures. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50, 2362-2376. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01652-7>
25. Zhang, Z., Yi, B., & Tan, Zh. (2012). Numerical Simulation of Flow Field in the Laval Nozzle Based on Euler Equation. *Journal of Physics: Conference Series*, art. 012089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012089>
26. Kassem, F.-M. (2025). Investigation of the effect of different throat diameters on the flow characteristics of a sonic nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/09544089251367241>
27. Luhtura, F. I. (2015). Issledovanie parametrov sverhzhukovykh neraschetnykh strui gaza [Study of the parameters of supersonic uncalculated gas jets]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 30(1), 192-202 [in Russian].
28. Odenthal, H.-J., Grygorov, P., Reifferscheid, M., & Schlüter, J. (2013). Advanced blowing and stirring conditions in the BOF process. Proceedings of the AISTech 2013 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 6–9 May 2013, Pittsburgh, PA., USA, pp. 897-909.
29. Duronio, F., Villante, C., & De Vita, A. (2023). Under-Expanded Jets in Advanced Propulsion Systems – A Review of Latest Theoretical and Experimental Research Activities. *Energies*, 16(18), art. 6471. <https://doi.org/10.3390/en16186471>
30. Muraoka, R., & Hiejima, T. (2022). Onset conditions for Mach disk formation in underexpanded jet flows. *Physics of Fluids*, 34(11), art. 116125. <https://doi.org/10.1063/5.0122861>
31. Franquet, E., Perrier, V., Gibout, S., & Bruel, P. (2015). Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 77, 25-53. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.06.006>
32. Lau, J. C., Morris, P. J., & Fisher, M. J. (1979). Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter. *Journal of Fluid Mechanics*, 93(1), 1-27. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001750>
33. Alam, M. M. A., Mamun, M., Hatsuse, Y., Islam, M. K., Saadi, M. M. U., & Takao, M. (2026). Mixing Characteristics of Supersonic Jets Injected into a Pressurized Gas Environment. *Applied Sciences*, 16(12), art. 6190. <https://doi.org/10.3390/app16126190>
34. Soulopoulos, N., Hardalupas, Y., & Taylor, A. M. K. P. (2015). Mixing and scalar dissipation rate statistics in a starting gas jet. *Physics of Fluids*, 27(12), art. 125103. <https://doi.org/10.1063/1.4935233>
35. Krause, E. (2025). *Fluid Mechanics With Problems and Solutions, and an Aerodynamic Laboratory*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co.
36. Golub, T., Molchanov, L., & Semykin, S. (2023). Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the gas dynamic simulation stand. *Science and Innovation*, 19(4), 79-92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>
37. Barker, M. (1922). On the use of very small pitot-tubes for measuring wind velocity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 101(712), 435-445. <https://doi.org/10.1098/rspa.1922.0055>
38. Otake, Y., Kashimura, H., Matsuo, S., Setoguchi, T., & Kim, H.-D. (2008). Influence of nozzle geometry on the neare-field structure of a highly underexpanded sonic jet. *Journal of Fluids and Structures*, 24(2), 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.07.003>

Надійшла/Received 13.07.2026

Прийнята/Accepted 26.08.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

T.S. Golub¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

L.S. Molchanov¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, e-mail: metall729321@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

O.M. Minai^{1,2}, PhD, Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy¹, Chief Researcher², e-mail: minayan1976@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4180-0149>

¹*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

²*Yuzhnoye State Design Office named after M.K. Yangel (Dnipro, Ukraine)*

Numerical Study of the Features of Gas Jet Formation During Blowing Through Composite Nozzles With Different Fractions of the Peripheral Component

The study of the features of the gas jet from nozzles of various designs is an important component of modern industrial science and technology, because gas purging is quite widely represented in various industries, including the metallurgical practice of steelmaking. At the same time, numerical research by means of CFD modeling (computational fluid dynamics) of gas-hydrodynamic processes using the ANSYS Fluent software package is currently gaining considerable popularity, which allows for obtaining results with considerable reliability, quickly and at low cost in a wide range of variable conditions for complex purging processes. The metallurgical industry is characterized by purging with an underexpanded jet to maintain stable operating conditions of the processes it accompanies, and the use of nozzles of various designs in accordance with the tasks set. The article presents the results of CFD modeling of the features of gas jet outflow from composite nozzles (nozzles have a central cylindrical part and a peripheral annular part located around the central one) with a different fraction of the peripheral annular component in the overpressure range of 200-600 kPa. The results of the studies were compared with the results of purging through a cylindrical nozzle of equivalent diameter. The geometric features of gas jet formation under conditions of increasing the peripheral component and overpressure were established. The advantages of a larger fraction of the peripheral annular component in relation to the value of the Mach number at the outlet of the purge nozzle and the length of the potential core of the jet were indicated. In accordance with the results of mathematical statistical processing, predictive dependences of the position of the first Mach disk and the length of the potential core were established on the jet underexpansion index and the design features of composite nozzles, expressed in the ratio of the outer diameters and the intersection planes of the peripheral and central components. The verification of them indicated the sufficiently high adequacy.

Keywords

Gas blowing, underexpanded gas jet, composite nozzle, peripheral fraction, gas dynamic processes, numerical modeling, Mach number, CFD modeling.