

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-31-37>

УДК 622

## ВПЛИВ ШОРСТКОСТІ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ СОПЛА ЛАВАЛЯ НА ПАРАМЕТРИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

Михайлюк В.В., Лях М.М., Paweł Gara,  
Витвицький В.С., Дейнега Р.О., Процюк Г.Я.

## THE INFLUENCE OF THE WORKING SURFACE ROUGHNESS OF THE LAVAL NOZZLE ON THE GAS FLOW PARAMETERS

Mykhailiuk V.V., Liakh M. M., Paweł Gara,  
Vytyvtskiy V.S., Deineha R.O., Protsiuk H.Y.

Охолодження газових сумішей широко використовується у різноманітних технологічних процесах в хімічній, нафтогазовій, цементній та інших галузях. Існує доволі багато різних способів охолодження, проте вони є енергозатратними, вимагають великогабаритного та складного обладнання тощо. Одним із найменш енергозатратних є – спосіб охолодження газу за допомогою сопла Лавалля. У статті розроблено тривимірну модель сопла Лавалля та за допомогою імітаційного моделювання досліджено вплив шорсткості внутрішніх поверхонь на його роботу. При цьому було враховано склад димових газів, їх температуру, тиск та витрату на вході у сопло і тиск та температуру на виході з нього. Для дослідження застосовано параметричне дослідження, а саме "аналіз можливих варіантів", що реалізується у програмі FlowSimulation, що є модулем програми SolidWorks. Застосування параметричного дослідження дозволило змінювати декілька параметрів (об'ємну витрату газу на вході у сопло та шорсткість внутрішньої поверхні сопла) для аналізу вибраних параметрів потоку, заданих як цілі (температуру газової суміші, число Маха). З метою підвищення точності отримуваних результатів імітаційного моделювання проведено оптимізацію сітки скінченних елементів так, що найдрібніші елементи розташовані найближче до поверхонь сопла, з якими контактує газовий потік. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що найбільше зниження температури газової суміші досягається за числа Маха близькому 3. При подальшому збільшенні витрати газової суміші її мінімальна температура залишається майже незмінною. Збільшення шорсткості внутрішніх поверхонь сопла призводить до незначного підвищення температури. Використання розробленої конструкції сопла Лавалля для охолодження димових газів виробництв можливе також і за чисел Маха, що є значно нижчими 3. При цьому децю підвищиться температура на виході з нього, але зменшиться тиск на його вході. Це є доцільним використанням сопла із врахуванням особливостей технологічних процесів на виробництві, оскільки можна використовувати менш вартісне обладнання для подачі газової суміші (не використовувати складні та дорогі компресори), або

взагалі за можливості відбирати газову суміш із трубопроводу вже із необхідним тиском.

**Ключові слова:** газова суміш, нафтогазова галузь, цементна галузь, охолодження, сопло Лавалля, число Маха, температура газу.

**Вступ.** Охолодження гарячих газів у хімічній, нафтогазовій, цементній та інших галузях використовується для забезпечення різноманітних технологічних процесів. Основними способами охолодження газового потоку є: розбавлення потоку повітрям, вприскування води у потік; використання обладнання (теплообмінників) тощо. Зазвичай для досягнення кращого охолодження ці способи комбінуються. Проте ці способи зазвичай є дорогі, у них використовується складне обладнання, яке потребує обслуговування та ремонту, також ці способи є енергозатратними.

Авторами [1] пропонується спосіб відділення рідини і механічних частинок з газового потоку за високої температури +120 °С...+160 °С. Необхідно зазначити, що за використання цього способу енерговитрати є мінімальними. Суть способу полягає у попередньому охолодженні газового потоку за допомогою багатосоплового пристрою та подальшому перетворенні охолодженої пари у дрібнодисперсні краплини рідини у буферній камері. Далі газорідний потік подається на сепаратори, в яких краплинна рідина і механічні частинки уловлюються. На виході отримується конденсат пари димових газів, що містить пил та

механічні домішки. Конденсат з домішками можна утилізувати або за можливості повторно використати у технологічному процесі. Пропонований спосіб можна застосовувати, наприклад, на цементному виробництві, оскільки у їх димових газах містяться шкідливі речовини, які негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей [2]. Необхідно зазначити, що до основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води ( $H_2O$ ), вуглекислий газ ( $CO_2$ ), закис азоту ( $N_2O$ ), метан ( $CH_4$ ), озон ( $O_3$ ), гексафторид сірки ( $SF_6$ ), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ).

Розроблення, дослідження та оптимізація обладнання для охолодження димових газів та очищення їх від окремих шкідливих частин є сьогодні актуальним завданням. Це дозволить підвищити ефективність його роботи, що, у свою чергу, зменшить енерговитрати на окремі технологічні процеси, і як наслідок зменшить шкідливий вплив на навколишнє середовище.

**Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій.** У роботі [3] розглядаються форсунок великих і малих розмірів, які широко використовуються у різних галузях промисловості. У роботі проведено дослідження впливу розмірів і шорсткості поверхні на експлуатаційні характеристики сопла Лавалю. Представлено варіацію продуктивності роботи форсунок від звичайного макро- до мікромасштабу. Встановлено, що габаритний розмір сопла чинить значний вплив на тертя газового потоку до поверхні сопла. Зі зменшенням розміру сопла швидкість і тяга погіршуються. Мікросопло має меншу чутливість до зміни шорсткості поверхні, ніж сопло великого розміру. У роботі також запропоновано технології покращення якості поверхні сопла та способи для запобігання задирів для зменшення впливу тертя на продуктивність мікронасадок. Також розроблено новий процес для контролю та зменшення утворення задирів під час обробки мікронасадок. Запропоновано матеріал, який необхідно наносити як покриття на шорстку оброблену поверхню перед її остаточною механічною обробкою. Результати випробувань на тягу показали, що використання такого процесу обробки сприяє покращенню експлуатаційних характеристик мікронасадки.

У роботі [4] проведено теоретичне оптимізаційне дослідження адіабатичних течій стисливих газів для конічних сопел із

внутрішньою шорсткою поверхнею. Розроблено математичну модель, що дозволяє визначити тягу з урахуванням тертя сопла та втрат на розбіжність. У першій частині дослідження показано, що в соплах із шорсткою поверхнею існують критичні значення півкута розкриття сопла, за яких додаткового збільшення швидкості газу не досягається. Також спостерігається, що мінімальне значення напівкута відкриття сопла збільшується зі збільшенням швидкості потоку та шорсткості внутрішньої поверхні сопла. У другій частині дослідження показано, що існують оптимальні значення половинного кута розкриття сопла для мінімальних гідравлічних втрат через сопло для кожної комбінації гідравлічного опору, викликаного шорсткістю внутрішньої поверхні та площі поперечного перерізу вихідного отвору сопла.

Траєкторія ріжучого інструменту значно впливає на продуктивність мікронасадок [5]. Різні траєкторії руху інструментів під час виготовлення насадки утворюють різні напрямки шорсткості поверхні. Тому виробники насадок повинні застосовувати оптимальну траєкторію ріжучого інструменту та параметри процесу різання. У цій статті подано оптимальні параметри обробки для виготовлення мікронасадки Лавалю із двома різними траєкторіями руху торцевої фрези. По-перше, запропоновано моделі шорсткості поверхні для різних типів траєкторії ріжучого інструменту. По-друге, розроблені теоретичні геометрії профілю для виготовлюваного сопла Лавалю. По-третє, вплив шорсткості поверхні на робочі параметри сопла, досліджується за допомогою обчислювального гідродинамічного аналізу. Змодельовані параметри продуктивності порівняні з їх теоретичними значеннями. Виявлено, що із збільшенням шорсткості поверхні, тяга явно зменшується. Також було виготовлено насадку з осью траєкторією руху інструменту та проведено оптимізацію параметрів різання.

Поява технології адитивного виробництва полегшила проектування та виготовлення деталей і моделей як для наукових досліджень так і у аерокосмічній промисловості [6]. Рух потоку у соплах не є новою темою дослідження, проте сопла, виготовлені за допомогою адитивного виробництва не були досліджені. Шорсткість поверхні та міцність надрукованих на 3D-принтерах сопел є основними проблемами, коли ці сопла застосовуються до стисливих потоків. У роботі показано

розроблене та випробуване конвергентне сопло та сопло Лавалю, яке виготовлене за допомогою адитивного виробництва з використанням пластику ABS. Шорсткість поверхні всередині збіжного сопла кількісно визначається за допомогою неруйнівного методу. Загалом експериментальні результати добре порівнюються з аналітичними рішеннями для збіжного сопла та чисельного моделювання, проведеного в ANSYS Fluent для сопла Лавалю. Сопла, надруковані за допомогою 3D-принтера можна використовувати для швидкої демонстрації та перевірки нових ідей і концепцій у педагогіці та дослідженнях за великих чисел Рейнольдса.

#### **Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання**

Метою роботи є дослідження впливу витрати, тиску та шорсткості на зміни термодинамічних параметрів сопла Лавалю з врахуванням складу газу.

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати тривимірну модель сопла Лавалю та встановити вхідні та вихідні параметри для імітаційного моделювання;
- провести імітаційне моделювання роботи сопла Лавалю, проаналізувати результати та встановити залежності зміни термодинамічних параметрів.

#### **Викладення основного матеріалу**

Одним із способів охолодження газу є застосування сопла Лавалю. Сопло складається з двох частин: дифузора та конфузора. Під час проходження газу крізь сопло досягається його швидкість, яка є більшою швидкості звуку (число Маха стає більшим 1). При цьому відбувається зниження тиску та температури газу після сопла.

Застосування такого сопла у виробничих процесах, зазвичай, обмежене параметрами обладнання, з яким воно застосовується. Також з метою зменшення затрат енергії на охолодження газу за використання сопла доцільно встановити його параметри при застосуванні у конкретному технологічному процесі.

Отже, сопло Лавалю, пропонується використовувати у технологічному процесі охолодження димових газів цементного виробництва. Розроблений спосіб відділення рідини та механічних домішок із газового потоку висвітлено у роботі [1]. Геометричні параметри сопла Лавалю, що використовується у багатосопловому пристрої, були досліджені у роботі [7].

Для дослідження впливу шорсткості робочої поверхні сопла Лавалю на параметри газового потоку побудовано тривимірну модель сопла Лавалю (рис. 1).

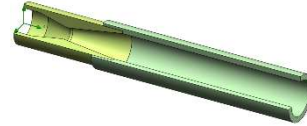


Рис. 1. Тривимірна модель сопла Лавалю

Для проведення імітаційного моделювання застосовано програму FlowSimulation, що є модулем програми SolidWorks, у якій було розроблено тривимірну модель сопла. Під час імітаційного моделювання застосовано модуль "Параметричне дослідження", який призначений для виконання серії розрахунків у одному з можливих режимів [8]:

- аналіз можливих варіантів, який дозволяє змінювати декілька параметрів (розміри моделі, параметри граничних умов, параметри початкової сітки тощо) для аналізу вибраних параметрів потоку (заданих як цілі);
- оптимізація цілі дозволяє змінювати тільки один вибраний параметр для отримання його визначеного значення, за якого вибрана цілі буде рівна заданому цільовому у цільовій функції або значенні);
- планування експериментів та оптимізація дозволяють працювати із наборами експериментів (розрахункових точок сценарію), у яких вибрані вхідні параметри будуть змінюватись у межах заданого мінімального та максимального значень.

Це дозволяє знайти рішення та провести оптимізацію дослідження для декількох вхідних змінних за використання внутрішньої технології оптимізації).

Газова суміш, що використовується під час дослідження сопла, складається з таких компонентів, масова концентрація яких (азот – 28 %; вода – 11 %; вуглекислий газ – 22 %; кисень – 9 %; повітря – 30 %) [2]. Температура газової суміші на вході у сопло згідно виробничих даних становить 120 °С. На виході газова суміш виходить у середовище з температурою 20 °С та тиском 121325 Па.

Під час імітаційного моделювання прийнято режим модуля "Параметричне дослідження" – "аналіз можливих варіантів". Вхідними змінними параметрами прийнято: об'ємну витрату на вході у сопло (0,02; 0,04; 0,06 та 0,08 м<sup>3</sup>/с) та шорсткість поверхонь сопла, з якими контактує газова суміш (0; 40; 80; 120;

160 та 200 мкм). Слід зазначити, що величини шорсткості слід зазначити у Rz [8]. Щодо напрямку руху газової суміші та граничних умов, то вона рухається зліва праворуч (згідно рисунку 1). Вихідними параметрами прийнято температуру газової суміші та число Маха (контролюються у всьому внутрішньому об'ємі сопла) і температуру газової суміші на виході з сопла (контролюється на вихідній поверхні обмежувальної кришки). Виходячи з кількості змінних параметрів, отримуємо 24 розрахункові точки.

Для підвищення точності отримуваних результатів було оптимізовано сітку скінченних елементів (рис. 2) так, що найдрібніші її елементи розміщуються найближче до поверхні сопла, з яким контактує газовий потік.

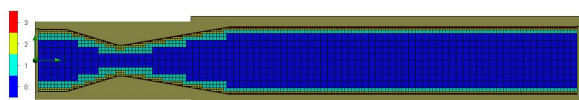


Рис. 2. Оптимізована сітка скінченних елементів

У таблиці наведено результати проведеного імітаційного моделювання.

Таблиця

Результати імітаційного моделювання

Параметр	Об'ємна витрата газової суміші на вході у сопло, м <sup>3</sup> /с	Шорсткість внутрішньої поверхні, мкм	Мінімальна температура газової суміші у соплі (у внутрішньому об'ємі), °С	Максимальне число Маха	Середня температура газової суміші на виході з сопла, °С
1	0,02	0	93,72	0,65	119,70
2	0,02	40	95,67	0,61	119,72
3	0,02	80	96,76	0,61	119,81
4	0,02	120	96,70	0,61	119,81
5	0,02	160	96,80	0,61	119,81
6	0,02	200	96,88	0,61	119,82
7	0,04	0	-119,45	2,95	25,33
8	0,04	40	-123,65	2,99	25,40
9	0,04	80	-123,42	2,99	25,79
10	0,04	120	-125,99	3,00	26,54
11	0,04	160	-125,86	3,00	26,82
12	0,04	200	-121,41	2,97	26,35
13	0,06	0	-113,00	2,89	17,74
14	0,06	40	-106,32	2,79	19,10
15	0,06	80	-98,32	2,68	19,31
16	0,06	120	-93,69	2,61	19,78
17	0,06	160	-98,13	2,67	19,87
18	0,06	200	-97,21	2,66	20,10
19	0,08	0	-99,38	2,73	24,73
20	0,08	40	-104,68	2,80	25,37
21	0,08	80	-94,98	2,67	25,73
22	0,08	120	-97,32	2,70	25,92
23	0,08	160	-101,50	2,76	26,10
24	0,08	200	-99,43	2,73	26,24

Для зручності аналізу отриманих результатів імітаційного моделювання їх подано у вигляді графічних залежностей.

На рисунку 3 показано залежність максимального числа Маха від параметрів, заданих у розрахункових точках.

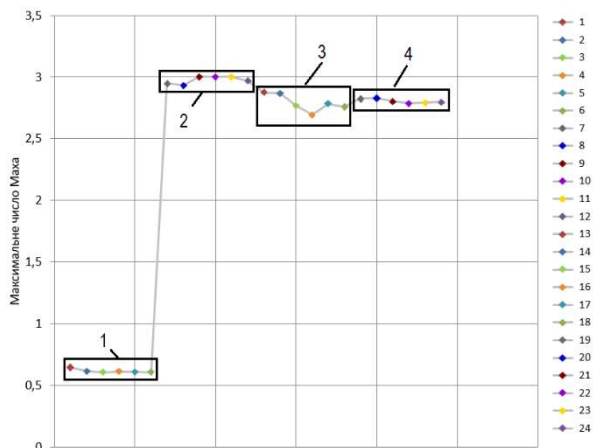


Рис. 3. Залежність максимального числа Маха від параметрів, заданих у розрахункових точках:

1 – 0,02 м<sup>3</sup>/с; 2 – 0,04 м<sup>3</sup>/с;  
3 – 0,06 м<sup>3</sup>/с; 4 – 0,08 м<sup>3</sup>/с

На цьому рисунку також згруповано розрахункові точки, у яких витрата газу на вході у сопло є однаковою.

На рисунку 4 зображено залежність мінімальної температури газової суміші у соплі (у внутрішньому об'ємі) від параметрів, заданих у розрахункових точках.

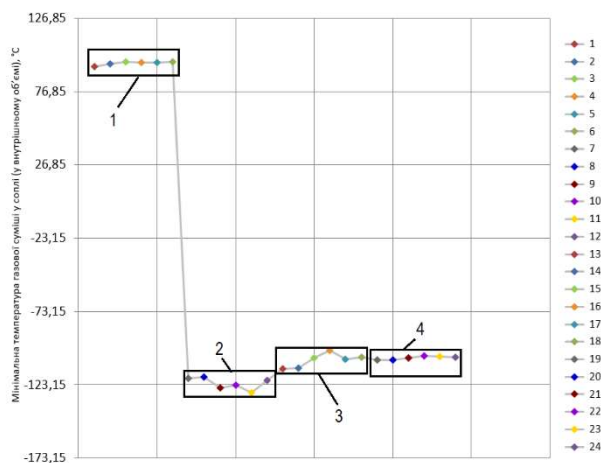


Рис. 4. Залежність мінімальної температури газової суміші у соплі (у внутрішньому об'ємі) від параметрів, заданих у розрахункових точках

1 – 0,02 м<sup>3</sup>/с; 2 – 0,04 м<sup>3</sup>/с;  
3 – 0,06 м<sup>3</sup>/с; 4 – 0,08 м<sup>3</sup>/с

На рисунку 5 зображено залежність середньої температури газової суміші на виході з сопла від параметрів, заданих у розрахункових точках.

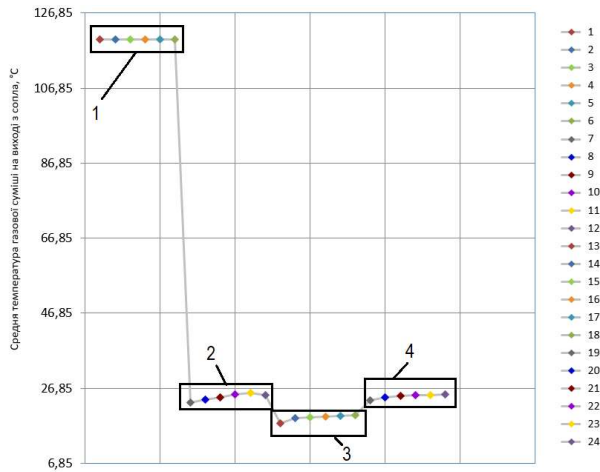


Рис. 5. Залежність середньої температура газової суміші на виході з сопла від параметрів, заданих у розрахункових точках:  
 1 – 0,02 м³/с; 2 – 0,04 м³/с;  
 3 – 0,06 м³/с; 4 – 0,08 м³/с

Згідно отриманих результатів імітаційного моделювання впливає, що програмне забезпечення FlowSimulation чутливе до зміни вхідних параметрів моделювання. Зниження температури газової суміші згідно рисунка 3 починається при перевищенні числа Маха величини 1. Мінімальна температура газової суміші у соплі (рис. 4) досягається при числі Маха близькому 3. При подальшому збільшенні витрати газової суміші її мінімальна температура залишається майже незмінною.

За різних витрат газової суміші (рис. 4 та рис. 5) спостерігається незначне підвищення температури при збільшенні шорсткості. Проте, цікавою є зона переходу від згрупованих точок 1 до згрупованих точок 2, оскільки саме тут відбувається збільшення швидкості руху газової суміші з дозвукової у надзвукову. Тому доцільно розглянути цю зону детальніше. Для цього обмежено та змінено деякі вхідні дані: замість об'ємної витрати на вході прийнято зміну тиску (від 50325 Па до 1001325 Па), шорсткість поверхні сопла, з якою контактує газова суміш, прийнято рівною Rz 25 (відповідає чистовому точінню). За таких вхідних даних отримано 10 розрахункових точок.

Отже, згідно результатів, мінімальна температура газової суміші (мінус 172 °C) у соплі буде за числа Маха рівного 3 та тиску на вході у сопло 578658 Па. Середня температура

газової суміші на виході з сопла складає 28 °C. Проте, необхідно зауважити, що середня температура газової суміші на виході з сопла у реальних умовах буде дещо вищою, оскільки під час імітаційного моделювання не було враховано теплопередачу стінок сопла. Також слід зазначити, що залежно від параметрів технологічного процесу, у якому може застосовуватись охолодження газового потоку за допомогою сопла Лавалю, його можна використовувати за значно менших чисел Маха, тим самим зменшуючи тиск на вході у нього. На виробництві тиск газової суміші може бути обмежений технологічними особливостями, наявним обладнанням (наприклад, для подачі гарячої газової суміші необхідно мати спеціальні вентилятори, для створення високого тиску – використовувати дорогі компресорне обладнання тощо).

### Висновки

Для охолодження димових газів різноманітних виробництв запропоновано використовувати спосіб, за якого димовий газ проходить через сопло Лавалю з надзвуковою швидкістю. Проте, під час виготовлення таких сопел, можливо отримати різні шорсткості внутрішніх поверхонь сопла. Для дослідження впливу шорсткості поверхні сопла побудовано його тривимірну модель та встановлено вхідні параметри: об'ємну витрату на вході у сопло та шорсткість поверхонь сопла, з якими контактує газова суміш. Вихідними параметрами прийнято температуру газової суміші та число Маха (контролюються у всьому внутрішньому об'ємі сопла) і температуру газової суміші на виході з сопла (контролюється на вихідній поверхні обмежувальної кришки). Отримано для дослідження 24 розрахункові точки.

Проведено імітаційне моделювання у програмі FlowSimulation, що є модулем програми SolidWorks. Перевірено, що використовуване програмне забезпечення є доволі чутливим до змінних параметрів моделювання. Встановлено, що найбільше зниження температури газової суміші (із врахуванням складу її компонентів) досягається за числа Маха близькому 3. При подальшому збільшенні витрати газової суміші її мінімальна температура залишається майже незмінною. Збільшення шорсткості внутрішніх поверхонь сопла призводить до незначного підвищення температури. Використання розробленої конструкції сопла Лавалю для охолодження димових газів виробництв можливе також і за

чисел Маха, що є значно нижчими 3. При цьому дещо підвищиться температура на виході з нього, але зменшиться тиск на його вході. Це є доцільним використанням сопла із врахуванням особливостей технологічних процесів на виробництві, оскільки можна використовувати менш вартісне обладнання для подачі газової суміші (не використовувати складні та дорогі компресори), або взагалі за можливості відбирати газову суміш із трубопроводу вже із необхідним тиском.

### Література

1. Патент на корисну модель № 152837, Україна, V03S 3/02. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку / Крижанівський Є.І. (UA); Лях М. М. (UA); Михайлюк В. В. (UA); Маковійчук М.В. (UA); Кучірка Ю.М. (UA); Витриховський Є.А. (UA) – u202200306; Заявл. 25.01.2022; Опубл. 19.04.2023, Бюл. № 16. 4 с.
2. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. цементна промисловість/ С. В. Плашихін. К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
3. Cai, Y., Liu, Z., & Shi, Z. (2017). Effects of dimensional size and surface roughness on service performance for a micro Laval nozzle. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa6552>.
4. Vlassov, D., Vargas, J., & Ordonez, J. (2007). The optimization of rough surface supersonic nozzles. *Acta Astronautica*, 61, 866-872. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2007.01.068>.
5. Cai Y, Liu Z, Shi Z, Song Q, Wan Y. Optimum end milling tool path and machining parameters for micro Laval nozzle manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231(10):1703-1712. doi:10.1177/0954405415608601
6. Chen M, Baby R, Dillard S, Lee YT and Ekkad S (2022) Design and test a converging and de Laval nozzle using additive manufacturing. *Front. Aerosp. Eng.* 1:951987. doi: 10.3389/fpace.2022.951987
7. Лях М.М., Михайлюк В.В., Яцишин Т.М., Витриховський Є.А. (2022). Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалія на зміну температури потоку газу. *Прикарпатський вісник наукового товариства імені Шевченка*. Число, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
8. Flow Simulation. 2020. Technical Reference SolidWorks Flow Simulation 2021. <https://www.cati.com/wp-content/uploads/2021/04/swflow2021-technical-reference.pdf> (Accessed: 29 May 2024).

### References

1. Patent na korysnu model № 152837, Ukraina, V03S 3/02. Sposib vydilennia ridyny i mekhanichnykh chastynok z hazovoho potoku / Kryzhanivskiy Ye.I. (UA); Liakh M. M. (UA); Mykhailiuk V. V. (UA); Makoviichuk M.V. (UA); Kuchirka Yu.M. (UA); Vytrykhovskiy Ye.A. (UA) – u202200306; Zaiavl. 25.01.2022; Opubl. 19.04.2023, Biul. № 16. 4 s.
2. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. tsementna promyslovist/ S. V. Plashykhin. K.: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. 96 s.
3. Cai, Y., Liu, Z., & Shi, Z. (2017). Effects of dimensional size and surface roughness on service performance for a micro Laval nozzle. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa6552>.
4. Vlassov, D., Vargas, J., & Ordonez, J. (2007). The optimization of rough surface supersonic nozzles. *Acta Astronautica*, 61, 866-872. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2007.01.068>.
5. Cai Y, Liu Z, Shi Z, Song Q, Wan Y. Optimum end milling tool path and machining parameters for micro Laval nozzle manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231(10):1703-1712. doi:10.1177/0954405415608601
6. Chen M, Baby R, Dillard S, Lee YT and Ekkad S (2022) Design and test a converging and de Laval nozzle using additive manufacturing. *Front. Aerosp. Eng.* 1:951987. doi: 10.3389/fpace.2022.951987
7. Liakh M.M., Mykhailiuk V.V., Yatsyshyn T.M., Vytrykhovskiy Ye.A. (2022). Doslidzhennia vplyvu he-ometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu tem-peratury potoku hazu. *Prykarpatskyi visnyk naukovo-ho tovarystva imeni Shevchenka*. Chyso, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
8. Flow Simulation. 2020. Technical Reference SolidWorks Flow Simulation 2021. <https://www.cati.com/wp-content/uploads/2021/04/swflow2021-technical-reference.pdf> (Accessed: 29 May 2024).

### Mykhailiuk V. V., Liakh M. M., Pawel Gara, Vytvytskyi V. S., Deineha R. O., Protsiuk H. Y. The influence of the working surface roughness of the Laval nozzle on the gas flow parameters

*Cooling of gas mixtures is widely used in various technological processes in the chemical, oil and gas, cement and other industries. There are quite a few different ways of cooling, but they are energy-consuming, require bulky and complex equipment, etc. One of the least energy-consuming methods is the method of gas cooling using a Laval nozzle. In the article, a three-dimensional model of the Laval nozzle was developed and the influence of the roughness of the internal surfaces on its operation was investigated using simulation modeling. At the same time, the composition*

of flue gases, their temperature, pressure and flow at the entrance to the nozzle and pressure and temperature at the exit from it were taken into account. For the study, a parametric study was applied, namely "analysis of possible options", which is implemented in the FlowSimulation program, which is a module of the SolidWorks program. The application of a parametric study made it possible to change several parameters (gas flow rate at the nozzle inlet and the roughness of the inner surface of the nozzle) for the analysis of selected flow parameters set as targets (gas mixture temperature, Mach number). In order to increase the accuracy of the simulation results obtained, the mesh of finite elements was optimized so that the smallest elements are located closest to the surfaces of the nozzle with which the gas flow is in contact. As a result of simulation modeling, it was established that the greatest decrease in the temperature of the gas mixture is achieved at a Mach number close to 3. With further increase in the flow rate of the gas mixture, its minimum temperature remains almost unchanged. An increase in the roughness of the internal surfaces of the nozzle leads to a slight increase in temperature. The use of the developed Laval nozzle design for cooling industrial flue gases is also possible at Mach numbers that are much lower than 3. In this case, the temperature at its exit will rise slightly, but the pressure at its entrance will decrease. This is an appropriate use of the nozzle, taking into account the peculiarities of technological processes in production, since it is possible to use less expensive equipment for supplying the gas mixture (do not use complex and expensive compressors), or, if possible, to take the gas

mixture from the pipeline already at the required pressure.

**Key words:** gas mixture, oil and gas industry, cement industry, cooling, Laval nozzle, Mach number, gas temperature.

**Михайлюк Василь Володимирович** – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Лях Михайло Михайлович** – к. т. н, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Pawel Gara** PhD, AGH University of Krakow

**Витвицький Василь Степанович** – к. т. н, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Дейнега Руслан Олександрович** – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Процюк Галина Ярославівна** – асистент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 25.04.2024.