

Прийнято 19.11.2025. Прорецензовано 06.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 532.529

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-65-74

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СОПЛА ЛАВАЛЯ

Фафлей О. Я. *

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15<https://orcid.org/0000-0002-6415-117X>e-mail: oleh.faflei@nung.edu.ua**Витвицький В. С.**

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15<https://orcid.org/0000-0003-3682-1612>e-mail: vasyl.vytskyi@nung.edu.ua**Грицанчук А. В.**

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15<https://orcid.org/0000-0001-9894-0911>e-mail: andrii.hrytsanchuk@nung.edu.ua**Волошин Ю. Д.**

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15<https://orcid.org/0000-0002-0582-1778>e-mail: yurii.voloshyn@nung.edu.ua

Анотація. Робота присвячена актуальній проблемі мінімізації викидів димових газів під час технологічних операцій у різних галузях промисловості. Особливу увагу приділено підвищенню енергоефективності охолодження та очищення газів, що є критичним етапом для подальшої рекуперації тепла і конденсації шкідливих компонентів. Більшість традиційних методів охолодження гарячого потоку газів потребують значних енергетичних витрат, складні в обслуговуванні, при цьому існує ризик корозії обладнання та обмежена ефективність при змінних параметрах потоку. Як альтернативний та енергоощадний підхід використовується сопло

Запропоноване посилання: Фафлей, О. Я., Витвицький, В. С., Грицанчук, А. В. & Волошин, Ю. Д. (2025). Дослідження впливу зовнішнього охолодження на ефективність роботи сопла Лавалля. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 65-74. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-65-74

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Лавалю, що забезпечує адіабатне охолодження газового потоку за рахунок перетворення внутрішньої енергії в кінетичну при досягненні надзвукових швидкостей. Надалі це дозволяє здійснити ефективне охолодження газів без додаткових холодильних систем, а також створює умови для часткової конденсації вологи. Метою дослідження є вивчення впливу зовнішнього охолодження на ефективність роботи сопла Лавалю. Для цього було розроблено та проаналізовано за допомогою імітаційного моделювання (CFD) дві моделі (одна – без охолодження, друга – з використанням «сорочки охолодження»). До обох моделей були застосовані однакові вхідні параметри. Як охолоджувальну рідину використано воду. Застосування охолодження сопла Лавалю знижує температуру газу з 78°C до 67°C. У процесі охолодження число Маха зменшується з максимального значення 3,2 до 2,9. Результати підтверджують, що зовнішнє охолодження значно підвищує ефективність теплообміну та розширює зону глибокого охолодження в соплі Лавалю. Надалі доцільно оптимізувати конструкцію та розташування охолоджувальної сорочки для досягнення ще вищих показників роботи сопла. Дослідження демонструє приклад практичного застосування CFD-аналізу як інструменту інженерного проектування та верифікації технічних рішень, що робить його цінним у контексті сучасних тенденцій цифрового моделювання та енергозбереження.

Ключові слова: сопло Лавалю, імітаційне моделювання, охолодження димових газів, зовнішнє охолодження, сорочка охолодження, надзвуковий потік, конденсація.

Вступ

Сучасні технологічні процеси пов'язані зі значними обсягами викидів димових газів, які мають високу температуру та містять токсичні компоненти: оксиди сірки, азоту, вуглецю, а також тверді пилові частинки. Це створює серйозні екологічні проблеми та знижує ефективність роботи систем енергетичного та технологічного обладнання. Охолодження димових газів є одним із ключових етапів підготовки перед їх очищенням та утилізацією тепла, оскільки зниження температури сприяє конденсації вологи, покращує ефективність уловлювання шкідливих домішок і забезпечує оптимальні умови для подальшої обробки газового потоку.

Традиційні методи охолодження, що ґрунтуються на використанні теплообмінників або зрошувальних камер, мають низку недоліків – значні енергетичні витрати, складність обслуговування, ризик корозії обладнання та обмежену ефективність при змінних параметрах потоку. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових енергоефективних підходів, які дозволяють зменшити температуру димових газів без додаткових витрат енергії.

Одним із перспективних напрямів є використання сопел Лавалю, що забезпечують адіабатне розширення потоку газу. При проходженні газів крізь звужувально-розширювальну частину сопла їх швидкість зростає до надзвукових значень, що супроводжується зниженням тиску та температури внаслідок перетворення внутрішньої енергії в кінетичну. Такий процес дозволяє здійснити ефективне охолодження газів без додаткових холодильних систем, а також створює умови для часткової конденсації вологи.

Дослідження процесів охолодження димових газів із використанням сопел Лавалю є ва-

жливим етапом розроблення нових технологічних рішень для енергетичних і промислових систем. Оптимізація геометричних параметрів сопла, моделювання газодинамічних процесів та оцінка ефективності охолодження відкривають можливості створення компактних, надійних і енергоефективних установок, здатних зменшити негативний вплив промислових викидів на довкілля.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях сопло Лавалю розглядається як компактний засіб для локального адіабатного охолодження газу: при переході через нього газ розганяється до надзвукових швидкостей, що супроводжується падінням температури і супроводжується конденсацією вмічених у газі парів та виділенням важких компонентів. У дослідженнях [1] встановлено, що водяна пара у вологому газовому потоці не конденсується безпосередньо на виході зі звужувальної частини сопла. Вона переходить у стан перенасичення, і лише згодом, у закритичній ділянці, зазнає раптової конденсації з утворенням крапель. Зокрема, при моделюванні протікання вологого природного газу в соплі Лавалю виявлено, що цей процес є високошвидкісним та чітко локалізованим. Сучасні чисельні дослідження також підтверджують, що при достатньому зниженні температури у соплі можливе й конденсування CO₂. Наприклад, за даними модельованої конденсації CO₂ в потоці, до ~18,6% маси CO₂ можуть перейти в рідку фазу, що вивільняє значну латентну теплоту і сприяє ефективному відділенню CO₂ [2]. Така конденсація важливих компонентів (вологи, CO₂, важких вуглеводнів) відкриває нові напрями очищення і рекуперації газів, що протікають крізь сопло Лавалю.

У світі останніми роками зростає інтерес до використання сопел Лавалю для охолодження і сепарації димових газів промислових підприємств. Зокрема, моделювання (CFD-моделювання) роботи сопел із врахуванням реальних складів димових газів, які висвітлені у роботі [3], показали, що метод охолодження газу за допомогою сопла Лавалю є одним із найменш енергоємних. У роботі враховано склад і температуру димових газів цементного виробництва та вплив шорсткості стінок сопла на ефективність роботи. Встановлено, що максимальне зниження температури газового потоку відбувається при числі Маха, близькому до 3, а при подальшому збільшенні витрати охолодження практично не змінюється. Автори також підкреслюють, що за рахунок конструктивних особливостей сопла охолодження можна проводити й при менших значеннях числа Маха, що дозволяє використовувати дешевше обладнання для подачі газу.

У роботі [4] досліджували вплив геометричних параметрів сопла Лавалю (діаметрів, кута конусності) на зміну температури потоку газу. Моделювання показало, що, хоча в усіх варіантах температура газу знижувалась приблизно від 100 °С до 60 °С, зона з мінімальною температурою виявилась дуже вузькою, а за нею відбувалося повторне підвищення температури до 70–80 °С. Таким чином, характерним недоліком сопел Лавалю є обмежена протяжність зони глибокого охолодження потоку.

Сопла Лавалю, окрім охолодження димових газів, також застосовуються у інших галузях – зокрема у нафтогазовій для охолодження та відділення компонентів суміші – конденсату. У пілотних випробуваннях 3S-сепаратори показали, що за однакового рівня вилучення важких компонентів вони потребують на 10–20% менше енергії компресора, ніж традиційні системи з турбодетандером [5]. Цей ефект забезпечується перетворенням частини ентальпії газу на кінетичну енергію, яка згодом відновлюється у дифузорах та вихрових охолоджувачах. Це дає змогу досягти низьких температур без використання додаткового охолоджувального контуру.

Отже, перевагами застосування сопел Лавалю є їх енергоефективність, компактність і надійність, висока інтенсивність охолодження, гнучкість застосування. До недоліків можна віднести відсутність енерговіддачі, обмежену зону охолодження, чутливість до умов роботи та складу середовища, знос поверхонь сопла через наявність твердих чи агресивних домішок.

Застосування сопел Лавалю відкриває нові можливості для рекуперації енергії та розділення газових потоків без традиційних холодогенераторів. У той же час їх реальна ефективність обмежена рядом факторів (ударні процеси, матеріальний знос, протяжність зони найнижчої температури). Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації форми сопла, вивченні конденсації та інтеграції з іншими методами очисних процесів (сорбцією, мембранними технологіями). Подальші розробки включають адаптацію конструкцій сопел до конкретних виробничих задач (наприклад, варіювання числа Маха, геометрії дифузоров, прямого обертуту потоку).

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у дослідженні впливу зовнішнього охолодження на ефективність роботи сопла Лавалю.

Для досягнення мети необхідно:

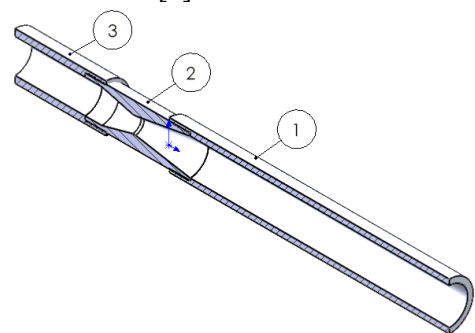
- побудувати тривимірну модель сопла Лавалю та встановити її термодинамічні характеристики із врахуванням складу газової суміші та температури;

- вдосконалити конструкцію сопла Лавалю встановивши на ньому елементи для підведення охолоджувальної рідини, провести імітаційне дослідження та встановити термодинамічні характеристики за аналогічних граничних умов як при дослідженні сопла без зовнішнього охолодження;

- порівняти отримані результати імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень було побудовано тривимірну модель, яка складається із сопла 2 та двох патрубків 1 та 3 (рис. 1). Розміри елементів сопла показані на рисунку 2. У наведеній моделі різьбовим з'єднанням знехтувано. Розміри сопла 2 прийняли відповідно до рекомендацій [4].



1, 3 – патрубок; 2 – сопло

Рисунок 1 – Тривимірна модель сопла Лавалю

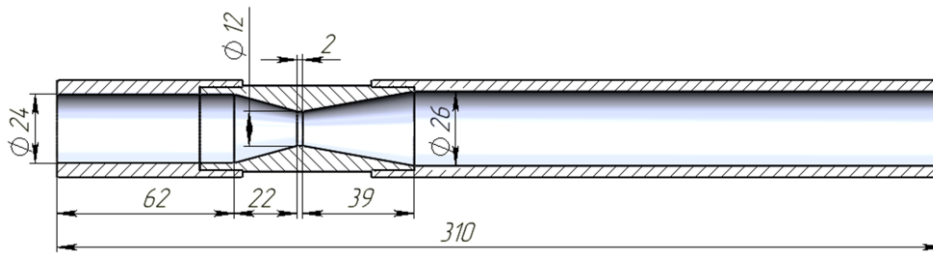


Рисунок 2 – Розміри елементів сопла

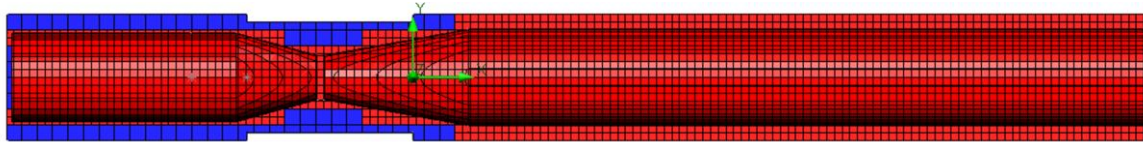


Рисунок 3 – Модель сопла, розбита на скінченні елементи

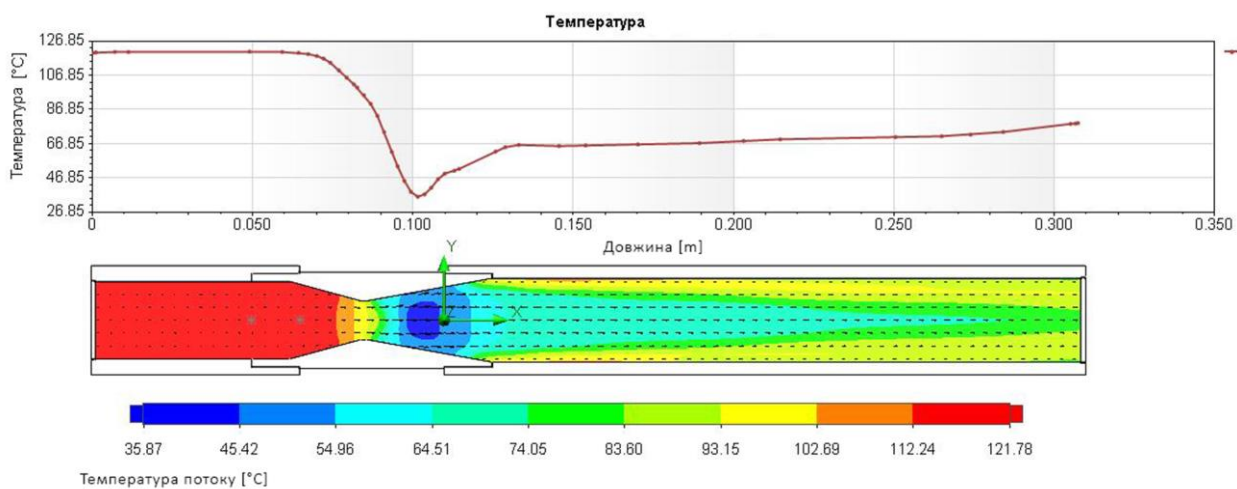


Рисунок 4 – Розподіл температури під час імітаційного моделювання сопла без охолодження (розподіли параметрів у поздовжньому перерізі)

Моделювання проведено у програмі SolidWorks FlowSimulation. Вхідними даними для дослідження прийнято: тиск на виході патрубку 3 – $p = 101325$ Па, витрата газової суміші на вході у патрубок 3 – $Q = 0,06$ м³/с. Склад газової суміші (об'ємна концентрація): пара – 33 %, вуглекислий газ – 22 %, азот – 45 %.

На рисунку 3 показано сітку скінченних елементів модель сопла, яка побудована із двоступеневим розбиттям.

На рисунку 4 показано отримані результати розподілу температури під час імітаційного CFD-моделювання сопла Лавалю.

Графік (рис. 4) демонструє зміну температури вздовж центральної осі сопла, а нижче наведено двовимірне температурне поле в осьовому перерізі з векторним напрямком руху потоку. У вхідній частині сопла (до 0,05 м) температура газового потоку становить близько 125°C, що відповідає початковим умовам моделювання. При звуженні каналу спостеріга-

ється різке падіння температури до мінімального значення близько 55°C у зоні горловини ($x \approx 0,1$ м). Це явище пояснюється ефектом адіабатного розширення: зі збільшенням швидкості руху газу частина внутрішньої енергії перетворюється в кінетичну, що викликає охолодження робочого середовища. Після проходження горловини у дифузійній частині сопла температура поступово підвищується до 85–90°C внаслідок часткового відновлення тиску, турбулентного перемішування та в'язкісних втрат.

Візуалізація температурного поля показує характерний градієнт кольорів – від червоного (висока температура на вході) до синьо-зеленого (мінімальна температура в зоні прискорення), що підтверджує формування зони інтенсивного охолодження. Потік зберігає стабільну структуру без значних зон рециркуляції, що свідчить про рівномірний розподіл швидкості й тиску вздовж осі сопла. Максима-

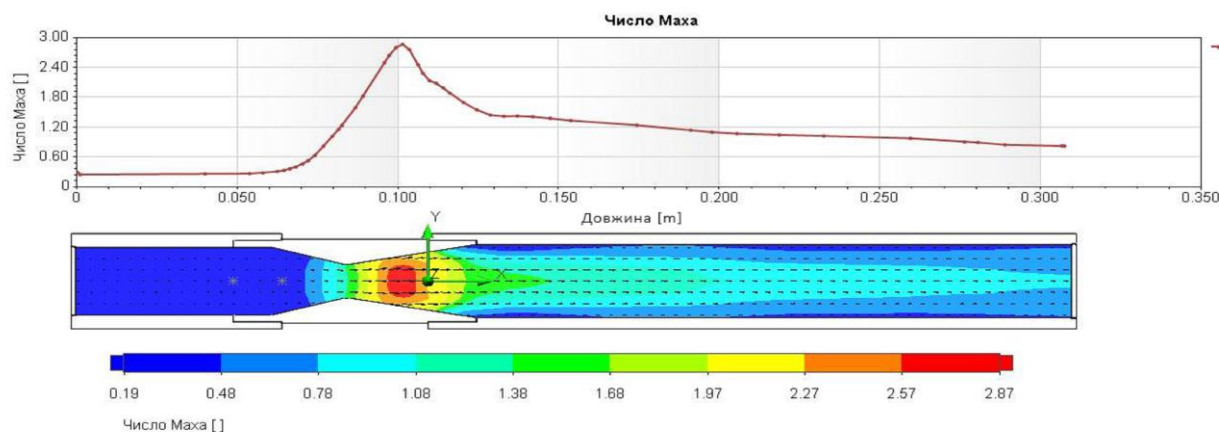


Рисунок 5 – Розподіл числа Маха під час імітаційного моделювання сопла без охолодження (розподіли параметрів у поздовжньому перерізі)

льний перепад температури становить близько 70°C , що відповідає високій ефективності адиабатного охолодження, навіть без додаткових систем тепловідведення.

На рисунку 5 показано отримані результати розподілу числа Маха під час імітаційного CFD-моделювання сопла Лавалю.

Графік (рис. 5) показує зміну числа Маха за довжиною каналу, а картина розподілу показує зміну числа Маха з векторним напрямком руху потоку. У вхідній ділянці каналу число Маха відзначається у підзвуковому інтервалі і зростає з наближенням до найменшого перерізу – горловини сопла, що відповідає прискоренню потоку в конфузурі. На ділянці близько 0.08–0.10 м крива перетинає значення $M = 1$, після чого у розширювальній частині спостерігається різке зростання до максимуму приблизно $M \approx 2.87$, що свідчить про формування стійкого надзвукового потоку в дифузурі. Контурна карта підкреслює локалізацію червоної зони високого числа Маха безпосередньо за звуженням, вказуючи на концентроване розширення і максимальний динамічний розгін газу у цьому місці; напрямки векторів руху вказують на осесиметричну, спрямовану течію без помітних вихрових зон, тобто на відносно ламінаризований або розгінно-стабільний характер потоку. Далі по довжині каналу крива числа Маха має монотонне зниження до значень близько $M \approx 1$ і нижче, що інтерпретується як результат виникнення ударної хвилі або серії ударних хвиль, які приводять до різкого зростання статичного тиску й температури з одночасним зниженням локальної надзвукової швидкості.

Характер спаду значень та контурні переходи кольорів свідчать про неповну адаптацію тиску потоку до навколишнього середовища і

про наявність внутрішньоканальних дисипативних процесів. Максимальне значення числа Маха – близько 2.87 – свідчить про значну ефективність розгінного плеча геометрії сопла за умов даних граничних і початкових умов (тискова і температурна різниця між вхідним і зовнішнім середовищем), проте подальше зниження M у дифузурі вказує на енергетичні втрати, пов'язані з ударним гальмуванням та можливими тертя-структурними ефектами стінок. З практичної точки зору, такий розподіл підкреслює, що для оптимізації продуктивності сопла слід прагнути або до більш ефективної адаптації тиску на виході, щоб уникнути сильної ударної взаємодії, або до цілеспрямованого розташування ударної хвилі у проектно-прийнятній зоні; експериментально або чисельно можна додатково визначити стійкість отриманої структури при варіюванні співвідношення тисків, зміні кута розширення дифузора або при введенні тонкого гідродинамічного контролю на стінках. У підсумку, представлені поля і профіль M відображають типовий перехід від підзвукового до надзвукового режиму через критичний переріз і подальший вплив ударних явищ, що має ключове значення для аналізу та оптимізації газодинамічних трактів і соплових систем.

На рисунку 6 показано розподіл температури у елементах конструкції сопла.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що сам ефект адиабатного розширення у соплі Лавалю забезпечує суттєве охолодження газового потоку. Проте відсутність зовнішнього охолодження обмежує глибину зниження температури та зону інтенсивного охолодження. Це зумовлює доцільність подальшого вдосконалення конструкції шляхом інтеграції водяної або повітряної сорочки, що

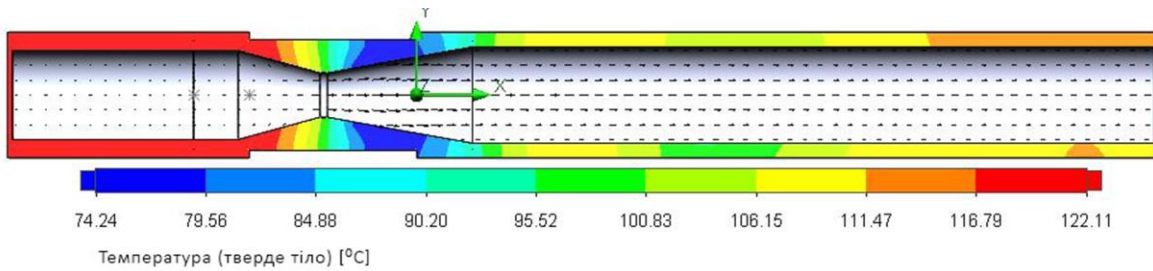
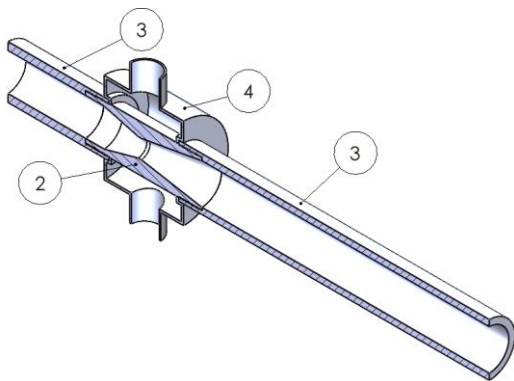


Рисунок 6 – Розподіл температури у елементах конструкції сопла без охолодження

дозволить підвищити ефективність рекуперації тепла та стабільність температурного поля при змінних умовах роботи.

Для зниження температури газової суміші на виході із сопла запропоновано організувати охолодження його зовнішньої стінки за допомогою проточної води. Для цього на модель сопла додано «сорочку охолодження» (рис. 7).



1, 3 – патрубок; 2 – сопло;
4 – «сорочка охолодження»

Рисунок 7 – Тривимірний модель сопла Лавалю з охолодженням

Вхідні дані для моделювання роботи сопла Лавалю з охолодженням аналогічні такі ж як і при моделюванні сопла без охолодження. Для охолодження сопла застосовано воду, яка подається у «сорочку охолодження» з витратою $0,0015 \text{ м}^3/\text{с}$ при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рисунку 8 показано результати імітаційного моделювання сопла Лавалю із зовнішнім охолодженням. Графік ілюструє зміну температури газового потоку вздовж центральної осі сопла, тоді як на епюрі представлено розподіл температурного поля та вектори швидкості в поперечному перерізі системи. Із отриманих даних видно, що у вхідній зоні температура потоку становить приблизно $125 \text{ }^\circ\text{C}$, після чого відбувається різке зниження до мінімального значення (близько $55 \text{ }^\circ\text{C}$) у зоні найменшого перерізу (горловини сопла). Така поведінка пов'язана з ефектом адіабатного розширення – перетворення внутрішньої енергії потоку в кінетичну, що супроводжується охолодженням. Подальший незначний ріст температури після горловини пояснюється частковим відновленням тиску та турбулентним перемішуванням потоку на виході.

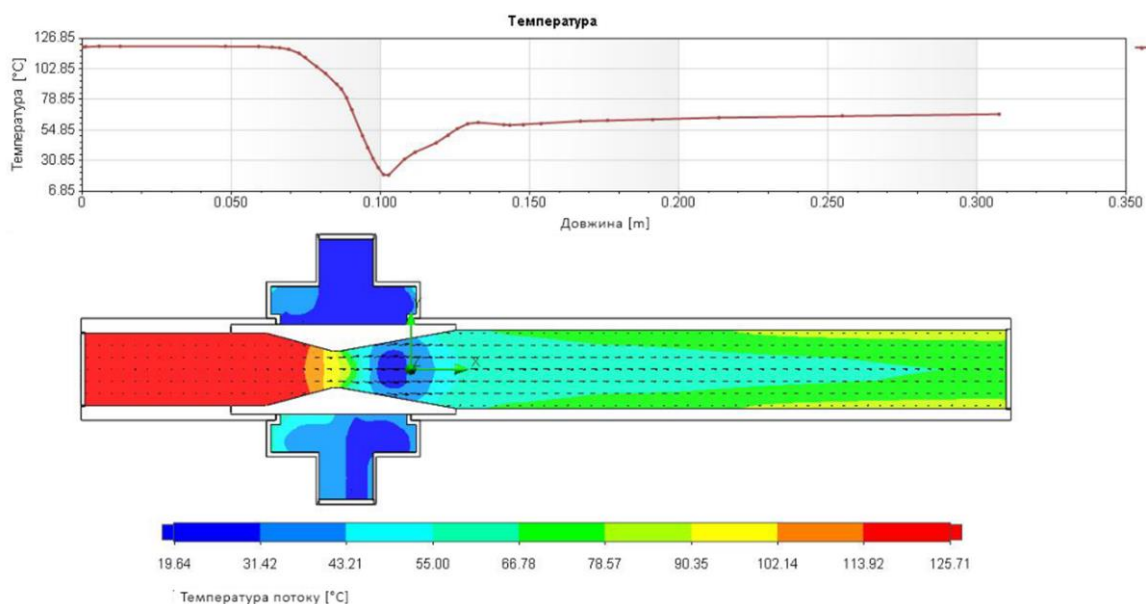


Рисунок 8 – Розподіл температури під час імітаційного моделювання сопла з охолодженням

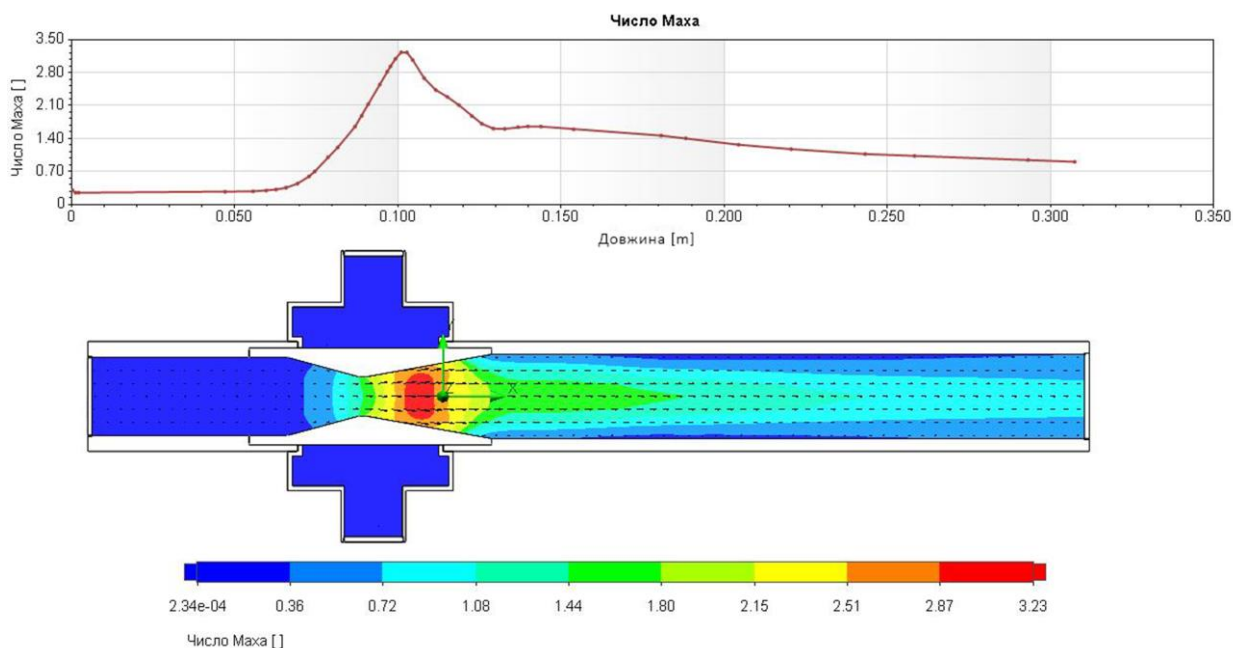


Рисунок 9 – Розподіл числа Маха під час імітаційного моделювання сопла з охолодженням

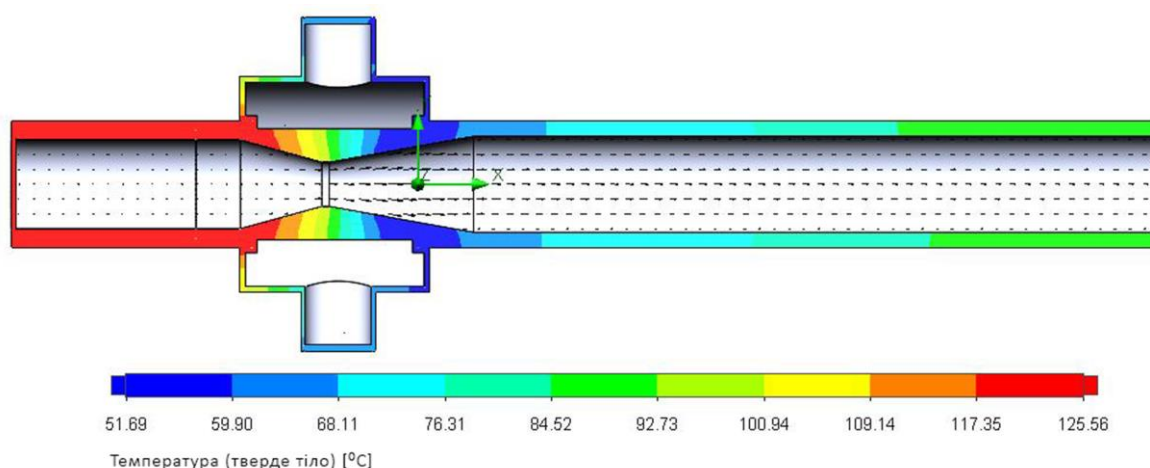


Рисунок 10 – Розподіл температури у елементах конструкції сопла з охолодженням

На епюрі розподілу температурного поля (нижня частина рисунка 8) чітко видно зону максимального градієнта температури у центральній частині сопла. Область блакитного та бірюзового кольору свідчить про ефективне охолодження, спричинене дією «сорочки охолодження». Векторні лінії демонструють стабільне прискорення потоку та збереження рівномірності його структури, що підтверджує оптимальний розподіл швидкісних параметрів при інтеграції системи охолодження.

На рис. 9 наведено результати чисельного моделювання газодинамічних процесів у соплі Лавалю із системою зовнішнього охолодження. Графік ілюструє зміну числа Маха вздовж осі каналу, а на епюрі представлено його просторовий розподіл сумісно з векторним полем швидкостей.

Як видно з графіка (рис. 9), у вхідній зоні (до 0,05 м) потік перебуває у дозвуковому режимі (число Маха $< 0,5$). У міру звуження каналу швидкість потоку зростає, і поблизу горловини ($\approx 0,1$ м) досягається максимум – близько $M = 3,2$, що відповідає надзвуковому режиму. У цій області відбувається інтенсивне розширення газу, перетворення теплової енергії в кінетичну та формування зони максимального прискорення. Після проходження мінімального перерізу канал поступово розширюється, що призводить до стабілізації та незначного зменшення числа Маха до $M \approx 2,7\text{--}2,9$ на виході.

На рисунку 10 показано розподіл температури у елементах конструкції сопла з охолодженням.

На картині розподілу (нижній фрагмент рисунка 9) червоні області відповідають зонам

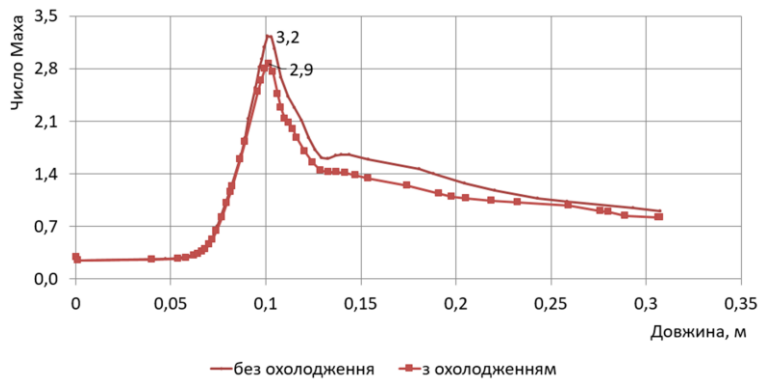


Рисунок 11 – Залежність зміни числа Маха вздовж осі сопла

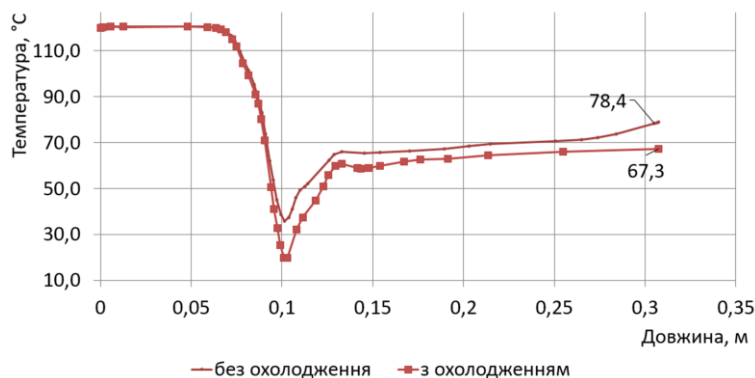


Рисунок 12 – Залежності зміни температури вздовж осі сопла

максимальних швидкостей, що простягаються від горловини вздовж осі сопла. Поступовий перехід кольорів від червоного до синього демонструє плавну зміну швидкісного профілю при русі газу. Наявність зовнішнього охолодження зумовлює зменшення температури потоку, а отже, збільшення його густини, що дещо знижує пікове число Маха порівняно з моделлю без охолодження (з 3,2 до 2,9).

Для зручності порівняння результатів моделювання на рисунку 11 подано спільні залежності зміни числа Маха, а на рисунку 12 – температури.

Отримані результати вказують, що застосування зовнішнього охолодження дозволяє знизити середню температуру газу з 78 до 67 °C, що свідчить про покращення тепловідведення на приблизно 14 %. При цьому спостерігається незначне зменшення числа Маха (з 3,2 до 2,9), що зумовлено зростанням густини охолодженого газу.

Таким чином, результати CFD-аналізу підтверджують, що охолодження сопла Лавалю впливає не лише на теплові, а й на газодинамічні параметри потоку. Зменшення температури спричиняє невелике падіння швидкості розширення, однак забезпечує стабільніший режим течії без турбулентних розривів і ударних хвиль. Це свідчить про покращення аеродина-

мічної стійкості системи та потенційне підвищення ефективності теплообміну.

Загалом, аналіз підтверджує ефективність комбінованого підходу – адиабатного та конвективного охолодження – для інтенсифікації теплообміну в соплі Лавалю. Результати можуть бути використані для подальшої оптимізації геометрії охолоджувальної сорочки, підвищення енергоефективності процесів рекуперації тепла та очищення промислових газів. Також подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію геометрії горловини та кута розширення дифузора з урахуванням параметрів охолоджувального середовища для досягнення максимальної швидкості при мінімальних теплових втратах.

Висновки

Дослідження роботи сопла Лавалю за допомогою імітаційного моделювання дозволили встановити його термодинамічні характеристики, зокрема зміни числа Маха та температури як у поперечному перерізі сопла, так і побудувати графічні залежності цих характеристик по осі сопла. Встановлено, що за прийнятих граничних умов, максимальне значення числа Маха становить близько 3, а температура знижується із 120 °C до 78 °C.

З метою підвищення ефективності роботи сопла запропоновано його вдосконалення, а саме застосування «сорочки охолодження» для відбору теплоти із зовнішньої поверхні сопла. Проведене імітаційне моделювання вдосконаленої конструкції сопла показало зниження температури газової суміші із 78 °C до 67 °C, а зміну числа Маха (максимальних значень) з 3,2 до 2,9. Знижується величина локальних перепадів температури в горловині, що позитивно впливає на стабільність течії та зменшує термомеханічні навантаження на стінки сопла.

Отримані результати демонструють перспективність використання «сорочки охоло-

дження» як пасивного способу підвищення енергоефективності. Такий підхід не потребує складних охолоджувальних систем, зменшує теплові втрати та створює сприятливі умови для конденсації вологи та шкідливих домішок у потоці димових газів.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Xiao R., Jin W., Han S., Li R., Cao X. Numerical simulation on condensing flow of water vapor of wet natural gas inside the nozzle. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 9, № 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5098/hmt.9.6>
2. Wen C., Karvounis N., Walther J. H., Yan Y., Feng Y., Yang Y. An efficient approach to separate CO₂ using supersonic flows for carbon capture and storage. *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 311–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.062>
3. Михайлюк В. В., Лях М. М., Paweł Gara, Витвицький В. С., Дейнега Р. О., Процюк Г. Я. Вплив шорсткості робочої поверхні сопла Лавалля на параметри газового потоку. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2024. № 3 (283). С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-31-37>
4. Лях М. М., Михайлюк В. В., Яцишин Т. М., Витриховський Є. А. Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалля на зміну температури потоку газу. *Прикарпатський вісник НТШ*. Число. 2022. № 17 (64). С. 108–117. DOI: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
5. Alfayorov V., Bagirov L. A., Dmitriev L. M., Feygin V. I., Imayev S., Lacey J. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. *Oil & Gas Journal*. 2005. Vol. 103, Issue 31. P. 53–58. URL: <https://www.ogj.com/pipelines-processing/gas-processing/article/17249221/supersonic-nozzle-efficiently-separates-natural-gas-components>

References

1. Xiao, R., Jin, W., Han, S., Li, R., & Cao, X. (2017). Numerical simulation on condensing flow of water vapor of wet natural gas inside the nozzle. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.5098/hmt.9.6>
2. Wen, C., Karvounis, N., Walther, J. H., Yan, Y., Feng, Y., & Yang, Y. (2019). An efficient approach to separate CO₂ using supersonic flows for carbon capture and storage. *Applied Energy*, 238, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.062>
3. Mykhailiuk, V. V., Lyakh, M. M., Gara, P., Vytvytskyi, V. S., Deineha, R. O., & Protsiuk, H. Ya. (2024). *Vplyv shorshstkosti robochoi poverkhni sopla Lavalia na parametry hazovoho potoku* [Influence of the Laval nozzle working surface roughness on the gas flow parameters]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, (3(283)), 16–24. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-31-37> [in Ukrainian]
4. Lyakh, M. M., Mykhailiuk, V. V., Yatsyshyn, T. M., & Vytrykhovskiy, Ye. A. (2022). *Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu* [Research on the influence of geometric parameters of the Laval nozzle on the gas flow temperature change]. *Prykarpatskyi visnyk NTSh. Chyslo*, (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) [in Ukrainian]
5. Alfayorov, V., Bagirov, L. A., Dmitriev, L. M., Feygin, V. I., Imayev, S., & Lacey, J. (2005). Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. *Oil & Gas Journal*, 103(31), 53–58. <https://www.ogj.com/pipelines-processing/gas-processing/article/17249221/supersonic-nozzle-efficiently-separates-natural-gas-components>

STUDY OF THE EFFECT OF EXTERNAL COOLING ON THE PERFORMANCE OF A LAVAL NOZZLE

Faflei O. Ya.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-6415-117X>
e-mail: oleh.faflei@nung.edu.ua

Vytvytskyi V. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0003-3682-1612>
e-mail: vasyl.vytvytskyi@nung.edu.ua

Hrytsanchuk A. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0001-9894-0911>
e-mail: andrii.hrytsanchuk@nung.edu.ua

Voloshyn Yu. D.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-0582-1778>
e-mail: yurii.voloshyn@nung.edu.ua

Abstract. This work addresses the pressing issue of minimizing flue gas emissions during technological operations in various industrial sectors. Particular attention is paid to enhancing the energy efficiency of gas cooling and purification, which is a critical stage for subsequent heat recovery and condensation of harmful components. Most traditional methods for cooling hot gas streams require significant energy consumption, are complex to maintain, carry a risk of equipment corrosion, and have limited effectiveness under variable flow parameters. As an alternative and energy-saving approach, a Laval nozzle is employed, providing adiabatic cooling of the gas flow by converting internal energy into kinetic energy upon reaching supersonic speeds. This enables effective gas cooling without additional refrigeration systems and creates conditions for partial moisture condensation. The aim of this research is to study the influence of external cooling on the performance of a Laval nozzle. To achieve this, two models were developed and analyzed using simulation modeling (CFD): one without cooling, and the other utilizing a "cooling jacket." Identical inlet parameters were applied to both models. Water was used as the cooling fluid. The application of cooling to the Laval nozzle reduces the gas temperature from 78°C to 67°C. During the cooling process, the Mach number decreases from a maximum value of 3.2 to 2.9. The results confirm that external cooling significantly enhances heat exchange efficiency and expands the deep cooling zone within the Laval nozzle. Further optimization of the design and placement of the cooling jacket is advisable to achieve even higher nozzle performance. The study demonstrates a practical application of CFD analysis as a tool for engineering design and verification of technical solutions, making it valuable in the context of modern trends in digital modeling and energy conservation.

Keywords: Laval nozzle, simulation modeling, flue gas cooling, external cooling, cooling jacket, supersonic flow, condensation.