

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-19-23>

УДК 532.529

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОСОПЛОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Фафлей О.Я., Михайлюк В.В., Витриховський Є.А.,
Дейнега Р.О., Витвицький В.С., Волошин Ю.Д.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A MULTI-STAGE DEVICE FOR COOLING INDUSTRIAL FACTORY FLUE GASES

Faflei O. Y., Mykhailiuk V. V., Vytrykhovskiy Y. A.,
Deineha R. O., Vytvytskyi V. S., Voloshyn Y. D.

У статті розглянуто проблему охолодження димових газів промислових підприємств як один із ключових напрямів підвищення енергоефективності та екологічної безпеки. Висока температура відхідних газів ускладнює роботу теплообмінного та газоочисного обладнання, сприяє збільшенню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Традиційні методи охолодження газу за допомогою, наприклад, теплообмінників, мають значні енергетичні витрати, проблеми корозійної стійкості та громіздкі конструкції, велику вартість, складність обслуговування. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання сопел Лавалю, що забезпечують адіабатне розширення потоку з перетворенням потенційної енергії газу в кінетичну, завдяки чому відбувається його інтенсивне охолодження. На основі аналізу публікацій, які стосуються охолодження газів визначено, що застосування сопел Лавалю ефективно не лише для зниження температури димових газів, а й для ініціювання конденсації вологи та відділення твердих і газоподібних домішок, зокрема вуглекислого газу і водяної пари. Для підтвердження працездатності підходу виконано імітаційне моделювання багатосоплового пристрою в середовищі SolidWorks FlowSimulation. Побудована тривимірна модель багатосоплового пристрою враховує реальні параметри димових газів і показує ефективне зниження температури потоку із 120°C до 72°C при числах Маха 1,1–2,7. Для підвищення ефективності охолодження запропоновано вдосконалення конструкції багатосоплового пристрою шляхом використання зовнішнього охолодження сопел за допомогою води. Результати імітаційного моделювання вдосконаленої конструкції

багатосоплового пристрою засвідчили покращення тепловідведення, зменшення температурного градієнта стінок і зменшення температури газового потоку на виході до величини 18°C. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання багатосоплових систем із соплами Лавалю в технологічних лініях охолодження димових газів та відкривають перспективи подальшої оптимізації їх геометрії й інтеграції у промислові газоочисні системи.

Ключові слова: сопло Лавалю, охолодження димових газів, багатосопловий пристрій, імітаційне моделювання, надзвуковий потік, число Маха.

Вступ. Проблема охолодження та очищення димових газів промислових підприємств є одним із ключових завдань сучасної енергетики та екології. Висока температура відхідних газів знижує ефективність роботи систем утилізації тепла, ускладнює процеси уловлювання пилу, оксидів сірки та азоту, а також сприяє підвищенням викидам парникових газів у навколишнє середовище [1]. Традиційні методи охолодження димових газів – за допомогою теплообмінників чи систем зрошення – часто мають значні енергетичні витрати, вимагають великих габаритів обладнання та супроводжуються проблемами корозії.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності газоочисних технологій є застосування сопла Лавалю, яке дозволяє реалізувати адіабатичне розширення потоку та зниження температури газів без

додаткових витрат енергії [2]. При проходженні димових газів крізь сопло відбувається їх прискорення до надзвукових швидкостей, що супроводжується зменшенням температури внаслідок перетворення внутрішньої енергії на кінетичну. Такий підхід не лише сприяє охолодженню, але й створює умови для конденсації вологи та випадіння домішок, що відкриває можливість інтеграції процесу з системами уловлювання шкідливих компонентів.

Вивчення процесів охолодження димових газів у соплі Лавалю дозволить обґрунтувати доцільність його використання в промислових умовах, визначити оптимальні геометричні параметри сопла та дослідити вплив вхідних характеристик потоку на ефективність зниження температури. Це забезпечить розробку нових енергоефективних технологій для зниження негативного впливу промисловості на довкілля.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Сопло Лавалю застосовується для перетворення енергії газу в кінетичну: при переході через сопло газ розганяється до швидкості звуку, далі у розширювальній його частині – набуває надзвукових швидкостей, при цьому тиск і температура знижується. Цей ефект використовується для адіабатного охолодження газу, індукованої неквазістійкої конденсації і, у разі сумішей – для сепарації важких компонентів (вода, рідкі вуглеводні, механічні частинки тощо).

У праці [3] виконано аналітичний аналіз стійкої ламінарної в'язкої течії в соплі Лавалю за умови охолодження його стінок. Основна увага приділена дослідженню характеристик потоку при великих значеннях числа Рейнольдса. Наведено відповідні рівняння та подано числові результати для типових параметрів у вигляді графічних залежностей. Встановлено, що інтенсивність охолоджуючого потоку, необхідного для підтримання сталої температури стінки, змінюється вздовж осі сопла.

У роботі [4] представлено результати дослідження технології надзвукової сепарації (3S-сепарації), призначеної для вилучення CO_2 з природного газу. Її зміст полягає у розширенні газового потоку в надзвуковому соплі Лавалю, де відбувається інтенсивне охолодження. Конденсація та поділ компонентів здійснюються безпосередньо в охолодженому потоці всередині сопла. У роботі також розглянуто різні технологічні схеми вилучення CO_2 та наведено

результати випробувань моделі 3S-сепаратора, які підтвердили високу ефективність процесу.

Враховуючи високі технічні характеристики надзвукового сепаратора для осушення природного газу, у роботі [5] запропоновано застосування процесу зрідження природного газу з використанням сопла Лавалю. Виконано теоретичні та чисельні дослідження надзвукової течії та процесу зрідження метано-етанової суміші в такому соплі. Проаналізовано вплив вхідних і вихідних параметрів (температури та тиску), а також складу газу на ефективність його зрідження.

Конструктивні параметри (діаметр, профіль тощо) визначають об'ємний витратний режим, інтенсивність охолодження та структуру течії, що критично для досягнення стабільного надзвукового режиму при змінних умовах димових газів.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання. Мета роботи полягає у дослідженні за допомогою імітаційного моделювання впливу зовнішнього охолодження багатосоплового пристрою на ефективність його роботи.

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати тривимірну модель багатосоплового пристрою та провести імітаційне моделювання з врахуванням складу та температури димових газів, встановити газодинамічні характеристики пристрою;

- вдосконалити багатосопловий пристрій, провести імітаційне моделювання з граничними умовами, аналогічними базовому багатосопловому пристрою, встановити газодинамічні характеристики вдосконаленого пристрою та порівняти їх з базовим.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження багатосоплового пристрою побудовано його тривимірну модель (рис. 1) у програмі SolidWorks.

Побудована модель складається із таких основних елементів як сопло 1, перегородка 2, корпус 3.

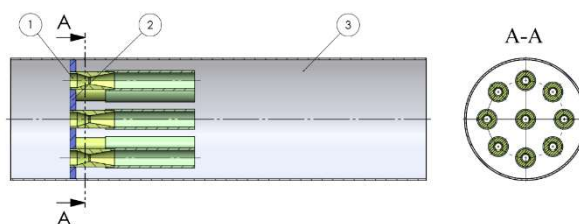


Рис. 1. Модель багатосоплового пристрою:
1 – сопло; 2 – перегородка; 3 – корпус

Геометричні параметри сопла Лавала, що викривається у багатосопловому пристрої, були досліджені у роботі [6].

Граничними умовами при імітаційному моделюванні прийнято об'ємну витрату газової суміші величиною $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ на вході у багатосопловий пристрій, тиск величиною 121325 Па – на виході. Температура газової суміші на вході у багатосопловий пристрій складає 120°C . Газорідинна суміш виходить з багатосоплового пристрою в атмосферу. Задані величини тиску та витрати газової суміші обумовлені технологічною схемою сепарації газу на виробництві. Також під час імітаційного моделювання враховано склад газової суміші, оскільки вона складається з багатьох компонентів (азот – 28 %; вода – 11 %; вуглекислий газ – 22 %; кисень – 9 %; повітря – 30 %) [1].

На рисунку 2, а показано зміну швидкості по осі багатосоплового пристрою, на рисунку 2, б – числа Маха, на рисунку 2, в – температури.

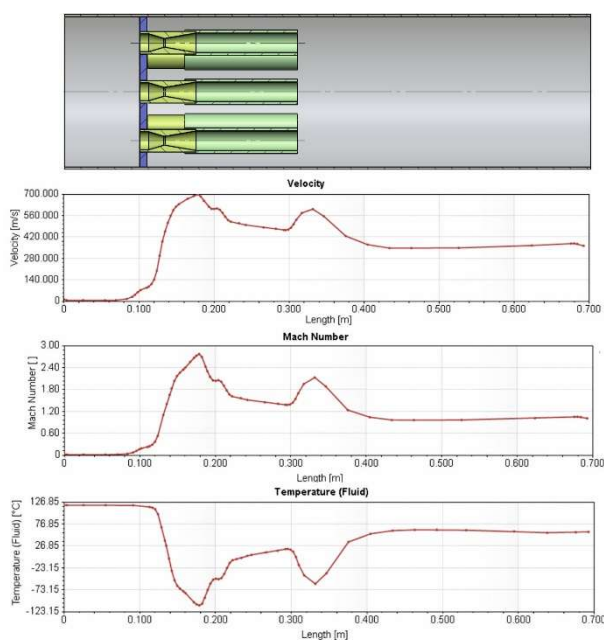


Рис. 2. Розподіли параметрів у поздовжньому перерізі багатосоплового пристрою:
а – швидкість; б – число Маха; в – температура

Згідно результатів (рис. 2) впливає, що охолодження газової суміші проходить із 120°C до 72°C . При цьому спостерігається надзвукові швидкості руху газової суміші.

З метою підвищення ефективності багатосоплового пристрою пропонується охолоджувати сопла за допомогою води. Для цього проведено вдосконалення пристрою, а

саме встановлення додаткової перегородки 3 та двох патрубків (вхідного 2 та вихідного 5) (рис. 3).

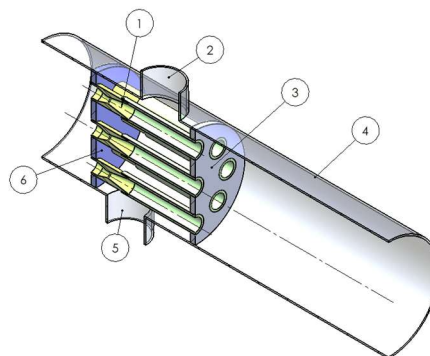


Рис. 3. Модель багатосоплового пристрою з охолодженням:

- 1 – сопло; 2 – патрубок вхідний (вода);
- 3, 6 – перегородка; 4 – корпус;
- 5 – патрубок вихідний (вода)

Імітаційне моделювання вдосконаленої конструкції багатосоплового пристрою проведено за аналогічних граничних умов, як і базової його конструкції.

Під час імітаційного моделювання задано витрату та температуру води для охолодження сопел Лавала (витрата – $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$, температура складає 20°C).

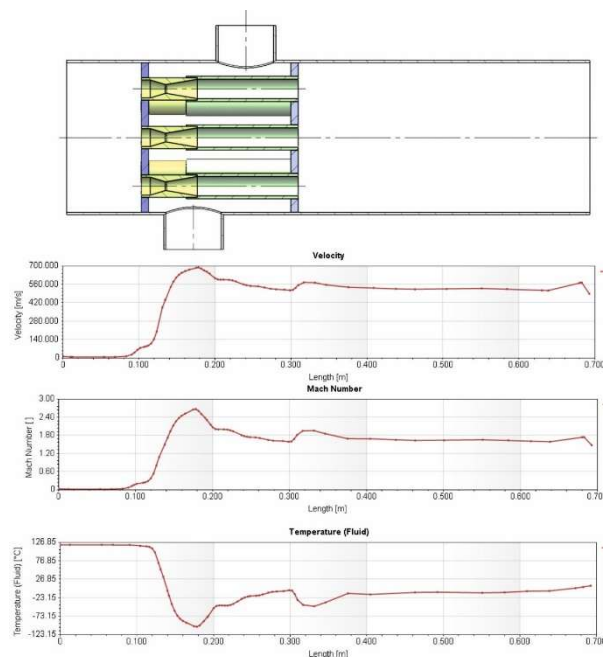


Рис. 4. Розподіли параметрів у поздовжньому перерізі вдосконаленого багатосоплового пристрою:
а – швидкість; б – число Маха; в – температура

За результатами дослідження (рис. 4) вдосконаленої конструкції багатосоплового пристрою впливає, що охолодження газової суміші із застосуванням охолодження сопел водою відбувається з 120°C до 18°C. При цьому також спостерігаються надзвукові швидкості руху газової суміші.

В подальших дослідженнях доцільно оптимізувати параметри руху охолоджуючої рідини для охолодження багатосоплового пристрою, підвищити ефективність охолодження, наприклад, конструктивними способами.

Висновки. Побудовано тривимірну модель багатосоплового пристрою в програмному середовищі SolidWorks та виконано імітаційне моделювання процесу руху димових газів з урахуванням їх складу та температури. За результатами моделювання встановлено основні газодинамічні характеристики пристрою, зокрема розподіл швидкості, числа Маха та температури. При цьому підтверджено формування надзвукових режимів течії та зниження температури газової суміші з 120 °C до 72 °C.

Вдосконалено конструкцію багатосоплового пристрою із зовнішнім водяним охолодженням сопел. Для модернізованої конструкції проведено імітаційне моделювання за граничних умов, аналогічних базовому варіанту, що забезпечило коректність порівняння отриманих результатів. За результатами моделювання вдосконаленого пристрою встановлено його газодинамічні характеристики, а також доведено суттєве підвищення ефективності охолодження: температура газової суміші знижується з 120 °C до 18 °C при збереженні надзвукових швидкостей течії. Отримані результати підтверджують доцільність застосування зовнішнього охолодження сопел та перспективність подальшої оптимізації параметрів руху охолоджуючої рідини й конструктивних елементів пристрою.

Література

1. Плашихін С. В. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
2. Михайлюк В. В., Крижанівський Є. І., Фафлей О. Я., Витвицький В. С., Дейнега Р. О. Удосконалення способу очищення димових газів підприємств переробки мінеральної сировини.

Мінеральні ресурси України. 2025. № 4. С. 54–58. DOI: 10.31996/mru.2025.4.54-58.

3. Gesellschaft fuer angewandte Mathematik und Mechanik. Wissenschaftliche Jahrestagung, Universitaet Karlsruhe, Федеративна Республіка Німеччина, 28–31 березня 1989 р. Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik. 1990. Bd. 70, Nr. 5. S. T413–T415. Нім.
4. Imaev S. Z., Bagirov L. A., Borisov V. E., Voytenkov E. V. New low temperature process of CO₂ recovery from natural gases. Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Adelaide, Australia, 2014. DOI: 10.2118/171427-MS.
5. Bian J., Cao X., Yang W., Ayivi M. E., Yin P., Jiang W. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle. Energy. 2018. Vol. 159. P. 706–715.
6. 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 наукового товариства імені Шевченка. Число. 2022. № 17(64). С. 108–117. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117.

References

1. Plashykhin S. V. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovist. Kyiv: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. 96 p.
2. Mykhailiuk V. V., Kryzhanivskiy Ye. I., Faflei O. Ya., Vytvytskyi V. S., Deineha R. O. Udoskonalennia sposobu ochyshchennia dymovykh haziv pidpriemstv pererobky mineralnoi syrovyny. Mineralni resursy Ukrainy. 2025. № 4. P. 54–58. DOI: 10.31996/mru.2025.4.54-58.
3. Gesellschaft fuer angewandte Mathematik und Mechanik. Wissenschaftliche Jahrestagung, Universitaet Karlsruhe, Федеративна Республіка Німеччина, 28–31 березня 1989 р. Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik. 1990. Bd. 70, Nr. 5. S. T413–T415. Нім.
4. Imaev S. Z., Bagirov L. A., Borisov V. E., Voytenkov E. V. New low temperature process of CO₂ recovery from natural gases. Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Adelaide, Australia, 2014. DOI: 10.2118/171427-MS.
5. Bian J., Cao X., Yang W., Ayivi M. E., Yin P., Jiang W. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle. Energy. 2018. Vol. 159. P. 706–715.
6. Liakh M. M., Mykhailiuk V. V., Yatsyshyn T. M., Vytrykhovskiy Ye. A. Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu. Prykarpatskyi visnyk naukovohto tovarystva imeni Shevchenka. Chyslo. 2022. № 17(64). P. 108–117. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117.

Faflei O.Y., Mykhailiuk V.V., Vytrykhovskiy Y.A., Deineha R.O., Vytvytskyi V.S., Voloshyn Y.D. Improving the efficiency of a multi-stage device for cooling industrial factory flue gases

The article discusses the problem of cooling flue gases from industrial enterprises as one of the key areas for improving energy efficiency and environmental safety. The high temperature of waste gases complicates the operation of heat exchange and gas cleaning equipment and contributes to an increase in harmful emissions into the environment. Traditional methods of gas cooling, such as heat exchangers, have significant energy costs, corrosion resistance problems, bulky designs, high costs, and maintenance complexity. One promising approach to solving this problem is the use of Laval nozzles, which provide adiabatic expansion of the flow with the conversion of the potential energy of the gas into kinetic energy, resulting in its intensive cooling. Based on an analysis of publications related to gas cooling, it has been determined that the use of Laval nozzles is effective not only for reducing the temperature of flue gases, but also for initiating moisture condensation and separating solid and gaseous impurities, in particular carbon dioxide and water vapor. To confirm the feasibility of this approach, a simulation of a multi-nozzle device was performed in SolidWorks FlowSimulation. The constructed three-dimensional model of a multi-nozzle device takes into account the actual parameters of flue gases and shows an effective reduction in flow temperature from 120°C to 72°C at Mach numbers of 1.1–2.7. To improve cooling efficiency, it is proposed to improve the design of the multi-nozzle device by using external cooling of the nozzles with water. The results of simulation modeling of the improved design of the multi-nozzle device showed improved heat dissipation, a reduction in the temperature

gradient of the walls, and a reduction in the temperature of the gas flow at the outlet to 18°C. The studies confirm the feasibility of using multi-nozzle systems with Laval nozzles in flue gas cooling lines and open up prospects for further optimization of their geometry and integration into industrial gas cleaning systems.

Key words: Laval nozzle, flue gas cooling, multi-nozzle device, simulation modeling, supersonic flow, Mach number.

Фафлей Олег Ярославович – к. т. н, доцент кафедри будівництва, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

Витриховський Євстахій Андрійович – аспірант, 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

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

Волошин Юрій Дмитрович – к. т. н, доцент кафедри буріння свердловин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 15.11.2025.