

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОПЛА ЛАВАЛЯ НА ЗМІНУ ТЕМПЕРАТУРИ ПОТОКУ ГАЗУ

**М. М. Лях, В. В. Михайлюк, Т. М. Яцишин, Є. А. Витриховський**  
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. +380978984786, e-mail: myhajlyukv@ukr.net*

*Сопло Лавалю отримало широке застосування у різних галузях національної економіки: машинобудуванні, хімічній та нафтохімічній галузі, військовій тощо. Потік газу, що проходить через сопло Лавалю змінює свої характеристики, а саме при досягненні швидкості потоку газу швидкості звуку, на виході із сопла відбувається зниження температури та тиску. Це явище можна використовувати для охолодження потоку газу. Проте у традиційній конструкції сопла Лавалю зона, у якій спостерігається найнижча температура, є невеликою. У цій статті проведено дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалю на зміну температури потоку газу. Для дослідження побудовано 12 різних конструкцій сопел, що мають однакові основні розміри: діаметр внутрішнього отвору, вхідні та вихідні діаметри, довжина сопла. Середовище та граничні умови, що використовувались під час імітаційного моделювання для всіх сопел приймалися однаковими. У результаті отримано розподіли температури середовища у поперечному перерізі для всіх досліджуваних конструкцій сопел. Проаналізувавши результати імітаційного моделювання встановлено, що у всіх конструкціях сопел спостерігається зниження температури приблизно у межах із 100 0С до 60 0С. Проте зони, у яких спостерігається максимальне зниження температури є досить малими. Після зон із найнижчими температурами у досліджуваних конструкціях сопел спостерігаються зони підвищення температури (у межах 70-80 0С), які є значно більшими за зони з мінімальною температурою. Далі, у наступній зоні відбувається наступне підвищення температури. Також на основі отриманих результатів моделювання вибрано конструкції сопел, які будуть далі досліджуватись та вдосконалюватись. Планується провести імітаційне моделювання сопел, де основна увага буде сконцентрована на такий параметр як число Маха, його вплив на зміну температури та її розподіл по довжині конструкції тривимірної моделі.*

**Ключові слова:** сопло Лавалю, потік газу, імітаційне моделювання, температура, тиск, охолодження.

### Вступ

У різних галузях промисловості виникає необхідність охолодження потоку газових сумішей у різноманітних технологічних процесах. Існують різні технології та обладнання, що для цього використовується. Наприклад, різноманітні теплообмінники, конденсатори тощо. Проте, застосування цього обладнання вимагає великих витрат енергії. В більшості випадків ці витрати енергії є економічно не вигідними. Тому проблема у вирішенні цього питання є актуальною.

В цій статті для пошуку більш економічного способу охолодження потоку газових сумішей розглядається можливість використати сопла Лавалю. Такий спосіб дає змогу знизити температуру газової суміші без використання примусового додаткового охолодження. Проте, для отримання необхідних низьких температур варто провести комплекс імітаційних та стендових досліджень.

### Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій

Сопло Лавалю – канал, що звужується посередині (рис. 1) [1]. Воно слугує для прискорення газового потоку, що проходить через нього, до швидкостей, вищих швидкості звука. Сопло широко використовується у парових турбінах, є важливою частиною ракетних двигунів та надзвукових реактивних двигунів. Сопло було розроблене у 1890 р. шведським винахідником Гюставом де Лавалем.

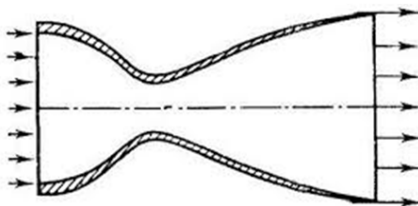


Рис. 1. Схема сопла Лавалю

Робота сопла основана на різних властивостях газового потоку на дозвукових і надзвукових швидкостях. Швидкість дозвукового потоку буде збільшуватись в міру звуження каналу, оскільки масова витрата є постійною. Потік газу в соплі Лавалю є ізоентропним (ентропія газу приблизно постійна). На дозвукових швидкостях газовий потік є таким, що стискається; звук (хвиля малого тиску) буде поширюватись через такий потік. Поблизу найменшого перерізу сопла локальна швидкість газу стає звуковою (число Маха  $M=1$ ). Як тільки площа перерізу сопла починає збільшуватись, газ продовжує розширюватись та газовий потік пришвидшується до надзвукових швидкостей, де звукова хвиля не проходить у зворотній бік через газ ( $M > 1$ ).

Сопло Лавалю буде працювати тільки в тому випадку, коли достатня масова витрата через сопло, у іншому випадку надзвукова швидкість не буде досягнена.

Також тиск газу на виході із частини сопла, що розширюється, не

повинен бути надто низьким. Оскільки тиск не може передаватися проти надзвукової течії, тиск на виході може бути значно нижчим тиску навколишнього середовища у яке витікає газ, але не надто малим, коли потік перестав бути надзвуковим, або буде розділюватися у частині сопла утворюючи нестабільний потік. На практиці, тиск навколишнього середовища повинен бути не більше ніж в 2,7 рази тиску у надзвуковому потоці газу (при цій умові надзвуковий потік може покинути сопло) [1].

Під час проходження газового потоку через сопло на певних ділянках його густина буде збільшуватись при збільшенні тиску.

Для математичного опису руху газу використовується рівняння стану ідеального газу та рівняння Ейлера. Із них можна вивести таке ключове рівняння:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dx} = -1M, \quad (1)$$

де величини  $\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}$  і  $\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dx}$  характеризують відносну степінь зміни по координаті  $x$  густини газу та його швидкість відповідно. Також рівняння (1) показує, що відношення між цими величинами рівне квадрату числа Маха (знак мінус означає протилежну направленість змін: при зростанні швидкості густина зменшується). Отже, на дозвукових швидкостях ( $M < 1$ ) густина змінюється в меншій степені ніж швидкість, а на надзвукових ( $M > 1$ ) – навпаки. Як буде видно далі, це і визначає форму сопла, що звужується-розширюється.

Оскільки масова витрата постійна

$$\rho \cdot V \cdot A = const,$$

де  $A$  – площа місцевого перерізу сопла, то

$$h\rho \cdot hV \cdot hA = h(const).$$

Диференціюючи обидві частини цього рівняння по  $x$ , отримаємо

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dx} + \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dx} = 0. \quad (2)$$

Після підстановки із (1) в (2), отримуємо

$$\frac{dA}{dx} = \frac{A}{V} \cdot \frac{dV}{dx} \cdot (M^2 - 1). \quad (3)$$

Із (3) видно, що при збільшенні швидкості газу в соплі знак виразу  $\frac{A}{V} \cdot \frac{dV}{dx}$  додатковий і, відповідно, знак похідної  $\frac{dA}{dx}$  визначається знаком виразу  $(M^2 - 1)$ .

З цього можна зробити наступні висновки:

– при дозвуковій швидкості потоку газу ( $M < 1$ ), похідна  $\frac{dA}{dx} < 0$  – сопло звужується;

– при надзвуковій швидкості потоку газу ( $M > 1$ ), похідна  $\frac{dA}{dx} > 0$  – сопло розширюється;

– під час руху потоку газу із швидкістю звуку ( $M = 1$ ), похідна

$\frac{dA}{dx} = 0$  – площа поперечного перерізу досягає екстремум, тобто має місце найменший поперечний переріз сопла, що називається критичним.

Отже, на ділянці що звужується (докритичній), рух потоку газу відбувається із дозвуковими швидкостями. У найвужчому (критичному) поперечному перерізі сопла локальна швидкість потоку газу досягає звукової. На ділянці, що розширюється (закритичній) газовий потік рухається із надзвуковими швидкостями.

Переміщуючись соплом потік газу розширюється, його температура та тиск знижуються, а швидкість зростає. Внутрішня енергія газу перетворюється у кінетичну енергію направлено руху. ККД цього перетворення у деяких випадках (наприклад, у соплах сучасних реактивних двигунів) може перевищувати 70%, що значно перевищує ККД реальних теплових двигунів інших типів.

На рис. 2 наведено ілюстрацію роботи сопла Лавалю [2]. В міру руху потоку газу в соплі, його абсолютна температура  $T$  та тиск  $p$  знижуються, а швидкість  $V$  зростає.

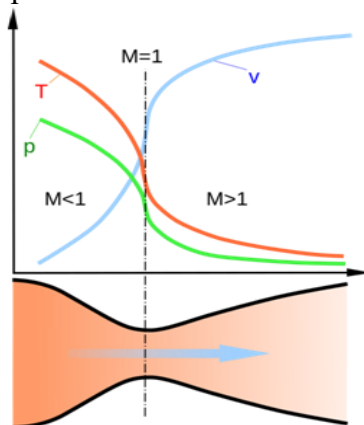


Рис. 2. Ілюстрація роботи сопла Лавалю

### Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Метою роботи є дослідження зміни температури потоку суміші пари з вуглекислим газом під час її проходження через різні форми сопел Лавалю.

Сопло Лавалю є доволі розповсюдженим, проте і сьогодні його конструкцію досліджують та вдосконалюють залежно від сфери застосування. Зважаючи на те, що під час проходження через сопло знижується температура середовища, то слід провести дослідження методом скінченних об'ємів зміну температури середовища при різних формах сопла Лавалю.

### Викладення основного матеріалу

Для визначення зміни температури потоку газового середовища, що проходить через сопло Лавалю, розроблено його параметричну модель у програмі Solid Works. Така модель дала змогу пришвидшити

проведення імітаційних моделювань за рахунок швидкої зміни геометричних розмірів і форми сопла та збереження алгоритму його розрахунку в програмі Flow Simulation.

На рис. 3 показано досліджувані форми конструкції сопел.

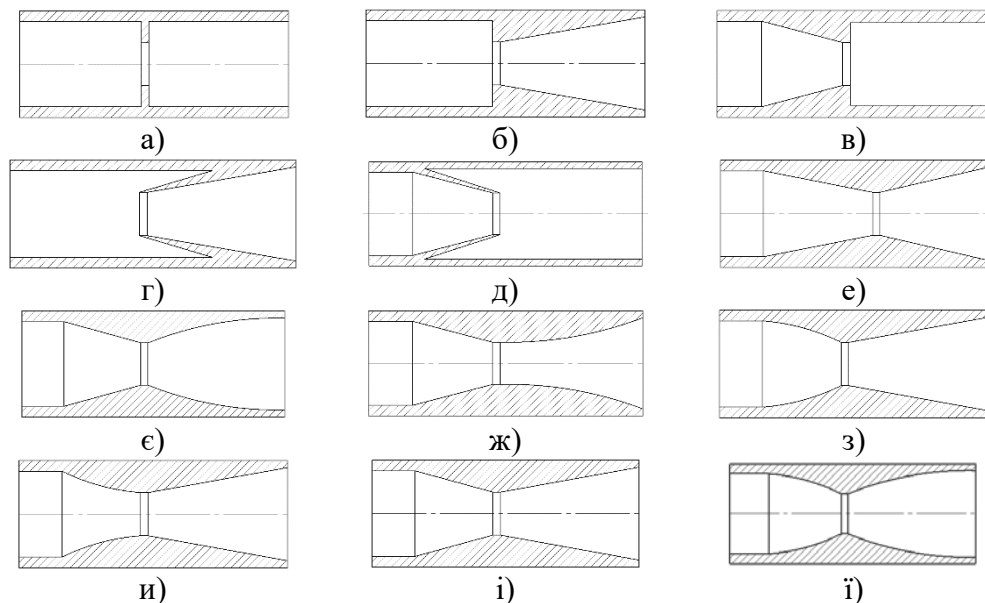


Рис. 3. Досліджувані форми конструкції сопел

На рис. 4 зображено креслення одного із сопел з основними розмірами, які є однаковими для всіх інших сопел.

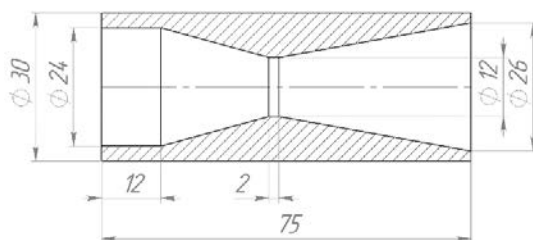


Рис. 4. Креслення сопла з вказаними основними розмірами, які однакові для всіх сопел

Вхідними даними для моделювання є:

- середовище (водяна пара (70 %) + вуглекислий газ (30 %));
- тиск на вході сопла – 1,5 атм;
- температура середовища 100 °С;
- витрата середовища – 0,06 м<sup>3</sup>/с;
- шорсткість внутрішніх поверхонь – Ra12,5.

Також під час імітаційного моделювання приймаються наступні припущення:

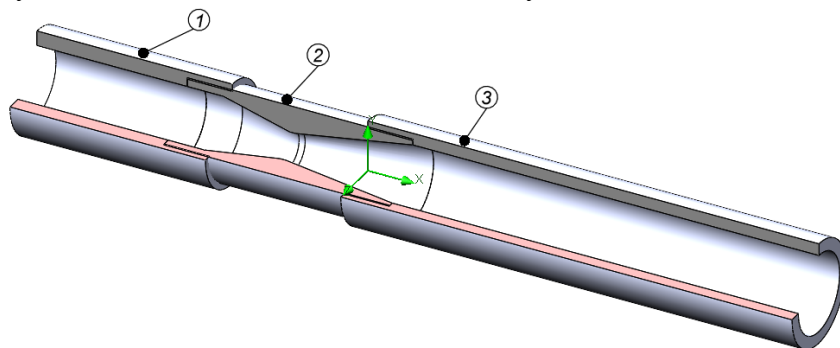
– газовий потік є ізентропним (тобто має постійну ентропію, сили тертя та дисепативні втрати не враховуються) та адіабатичним (тобто теплота не підводиться і не відводиться);

– рух газу є стаціонарним та одномірним, тобто у будь якій фіксованій точці сопла всі параметри потоку постійні у часі та змінюються тільки вздовж осі сопла, причому в усіх точках вибраного поперечного перерізу параметри потоку однакові, а вектор швидкості газу всюди паралельний симетрії сопла;

– масова витрата газу однакова у всіх поперечних перерізах потоку;

– впливом всіх зовнішніх сил та полів (в тому числі і гравітаційного) знехтувано.

На рис. 5 зображено тривимірну модель сопла 2 розміщену між вхідним 1 та вихідним 3 патрубками. Застосування патрубків у моделі дозволяє отримати точніші результати моделювання у соплі 2 за рахунок того, що граничні умови, які будуть прикладатися до моделі знаходитимуться на більшій відстані від досліджуваного сопла.



1 – вхідний патрубок; 2 – сопло; 3 – вихідний патрубок.

Рис. 5. Тривимірна модель для дослідження

З метою отримання точніших результатів моделювання внутрішній об'єм сопла розбито на дрібніші об'єми порівняно із об'ємами вхідного та вихідного патрубків (рис. 6).

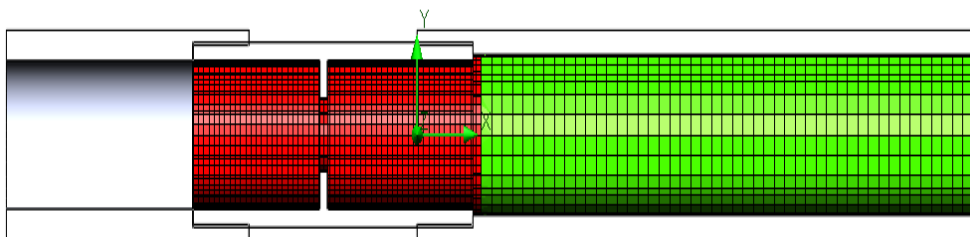


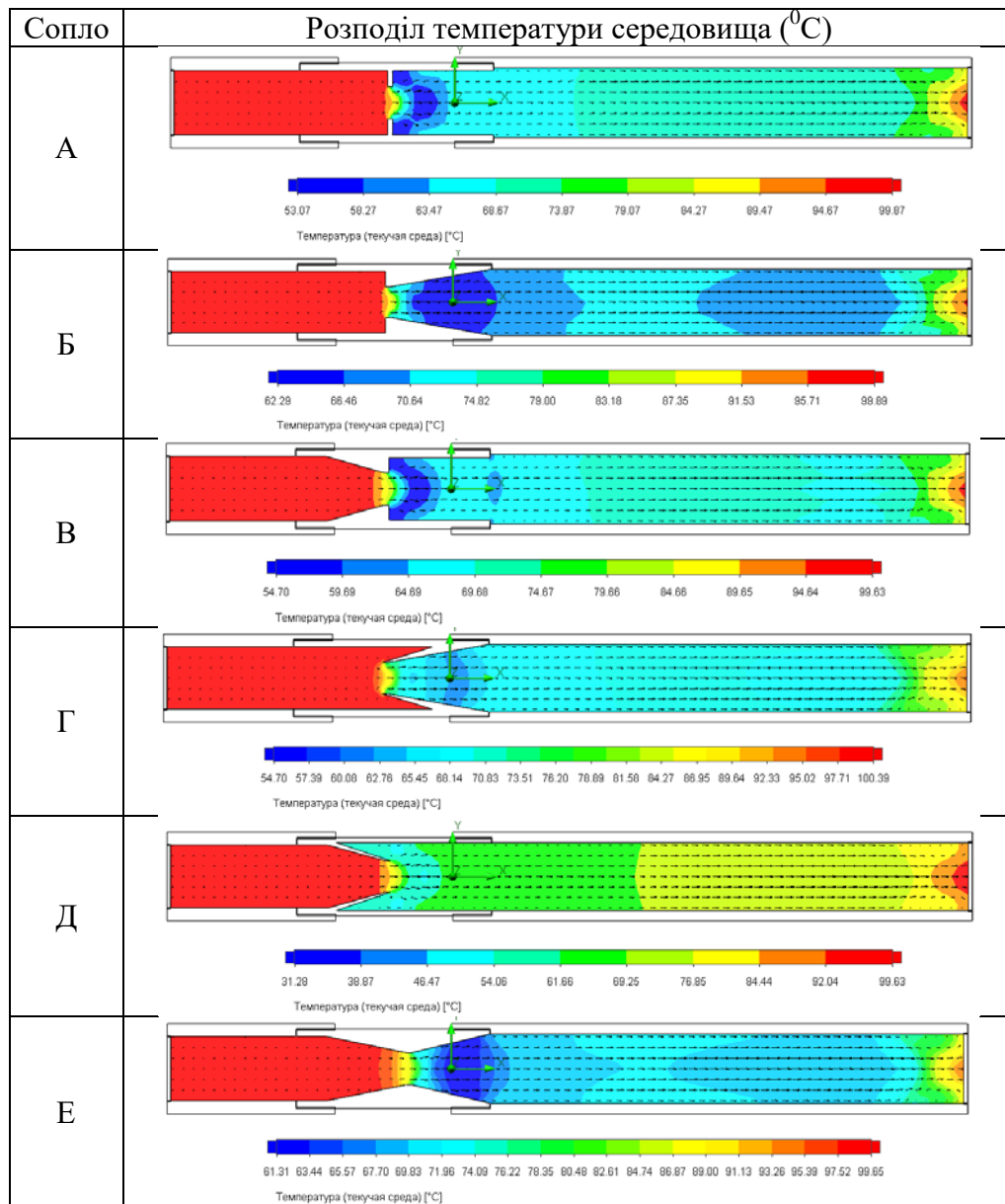
Рис. 6. Скінченні об'єми

Нижче наведені отримані результати імітаційного моделювання для досліджуваних форм конструкцій сопел. Доцільно зауважити, що у

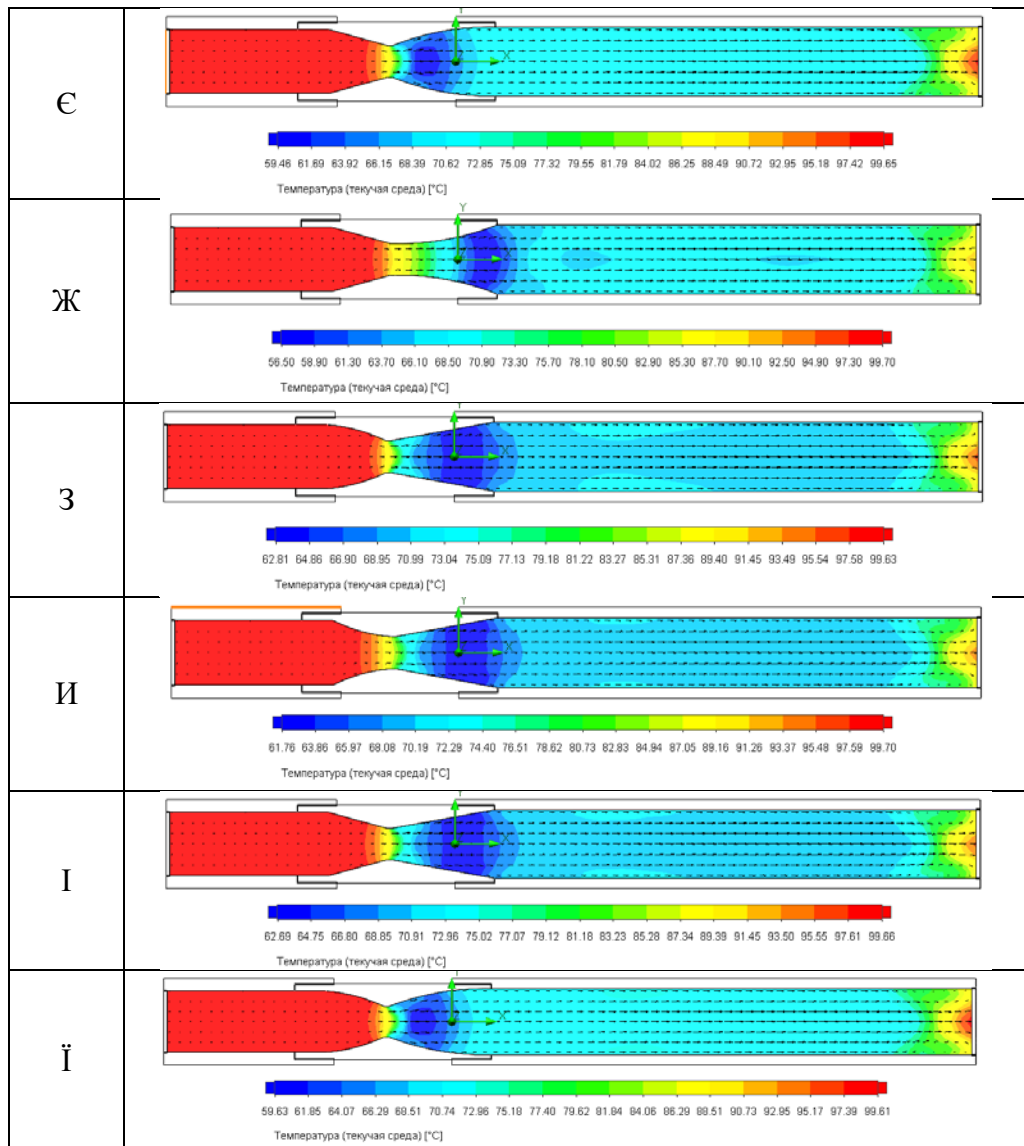
даній статті серед отриманих результатів в подальшому будемо розглядати один найбільш вагомий для практичного застосування параметр – температура по довжині потоку газового середовища.

Для зручності та наглядності отримані результати зведемо у таблицю 1. Ця таблиця дає можливість систематизувати та згрупувати за близькими вихідними температурними параметрами різні конструкції сопел.

Таблиця 1. Розподіл температури по довжині потоку газового середовища сопел різної форми



Продовження таблиці 1.



Виходячи із результатів, наведених у таблиці 1, можна розглядати наступні групи сопел: А та В; Б, Е, З, И та І; Г та Д; Є та İ; Ж.

Щодо температури середовища під час проходження його крізь сопло А та В, то згідно табл. 1, вона різко зменшується на виході сопла. Найнижча температура спостерігається саме біля стінок сопла та посередині потоку на невеликій відстані від нього. Це сопло для охолодження має і недолік – за рахунок геометричної форми з різкими змінами діаметрів створює значний опір рухові газового потоку. У нафтогазовій промисловості за таким же принципом працює нерегульований дросель, що встановлюється на фонтанній арматурі газової свердловини. За низьких температур відбувається його замерзання. Отже, вихо-



дючи із аналізу сопел А та В, вхідна частина сопла незначно впливає на розподіл температури потоку газового середовища на виході з сопла.

У соплах Б, Е, З, И та І зона з найменшою температурою спостерігається у частині, що розширюється. На довжину цієї зони буде впливати форма вхідної частини сопла. Сопла Г та Д дають найменший ефект охолодження. Найнижчі температури спостерігаються у локальних малих зонах. Зміни температури у соплах Є та Ї є досить схожими на виході із них. Вхідні частини сопел незначно впливають на температурні зони на виході. У соплі Ж зона найменшої температури спостерігається на виході із нього та початку вихідного патрубка.

Всі форми конструкцій сопел Лавалю, розглянуті вище, дають зниження температури в межах близьких із  $100^{\circ}\text{C}$  до  $60^{\circ}\text{C}$ . Проте зона, у якій відбувається максимальне пониження температури є доволі незначною. Після цієї зони йде зона з температурою, що знаходиться у межах  $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ . Підтримання температури у цій зоні на одному рівні спостерігається на більшій довжині, ніж у зоні 1. Далі середовище переходить у зону підвищення температури.

З отриманих результатів моделювання можна також зробити висновки, що найбільша довжина зони з найнижчою температурою суміші спостерігається у сопел, що мають конічний та випуклий дифузор на виході. Також сопла, що мають різкі переходи на вході створюють значний опір руху газового середовища.

Варто зауважити, що явище охолодження буде кращим тоді, коли швидкість середовища наближається або незначно перевищує швидкість поширення звуку у ньому, тобто за числа Маха, що є близьким до 1.

Для конструкції сопла Лавалю, у якій буде отримано найбільш ефективний результат охолодження газового потоку, необхідно провести додатковий комплекс імітаційних на стендових досліджень.

В наступних дослідженнях планується провести імітаційне моделювання сопел, де основна увага буде сконцентрована на такому параметрі як число Маха, а також оцінити його вплив на зміну температури та її розподіл по довжині конструкції тривимірної моделі.

### **Висновки**

У роботі для подальших досліджень і обґрунтувань геометричних параметрів та режимів руху потоку газу на основі попередніх досліджень вибираємо сопла Б, Е, З, И, Ж та І, у яких на даному етапі досліджень отримані найбільший необхідний температурний ефект.

Встановлено, що найменший вплив на температуру мають геометричні форми вхідної частини сопел. Найнижчий ефект охолодження спостерігається у соплах Г та Д.

### **Література**

1. <https://studfile.net/preview/5809458/page:2/> (Дата звернення: 01.11.2022).
2. <https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B>

0\_%D0%9B%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%8F (Дата звернення: 01.11.2022).

*Стаття надійшла до редакційної колегії 15.11.2022 р.*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE LAVAL NOZZLE ON THE GAS FLOW TEMPERATURE CHANGE

**M. M. Liakh, V. V. Mykhailiuk, T. M. Yatsyshyn Y. A. Vytrykhovskiy**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;*

*St. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019;*

*e-mail: myhajlyukv@ukr.net*

*The Laval nozzle was widely used in various branches of the national economy: mechanical engineering, chemical and petrochemical industry, military, etc. The gas flow passing through the Laval nozzle changes its characteristics, namely when the gas flow velocity reaches the speed of sound, the temperature and pressure drop at the exit from the nozzle. This phenomenon can be used to cool the gas flow. However, in the traditional Laval nozzle design, the zone where the lowest temperature is observed is small. In this article, a study of the influence of the geometrical parameters of the Laval nozzle on the change in the temperature of the gas flow is carried out. For the study, 12 different designs of nozzles were built, having the same basic dimensions: diameter of the inner hole, inlet and outlet diameters, length of the nozzle. The environment and boundary conditions used during the simulation were assumed to be the same for all nozzles. As a result, distributions of the temperature of the environment in the cross section for all the studied nozzle designs were obtained. Analyzing the results of the simulation, it was found that in all nozzle designs there is a decrease in temperature approximately from 100 0C to 60 0C. However, the zones in which the maximum decrease in temperature is observed are quite small. After the zones with the lowest temperatures in the studied nozzle designs, there are zones of increased temperature (in the range of 70-80 0C), which are significantly larger than the zones with the minimum temperature. Then, in the next zone, a subsequent increase in temperature occurs. Also, on the basis of the simulation results, nozzle designs were selected, which will be further investigated and improved. It is planned to carry out simulated painting of nozzles, where the main attention will be focused on such a parameter as the Mach number, its effect on the temperature change and its distribution along the length of the three-dimensional model structure.*

**Keywords:** *Laval nozzle, gas flow, simulation, temperature, pressure, cooling.*