DOI 10.31891/2307-5732-2024-339-4-57 УДК 622

МИХАЙЛЮК ВАСИЛЬ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу https://orcid.org/0000-0002-3329-2068

e-mail: <u>myhajlyukv@ukr.net</u> TOMASZ GÓRAL

AGH University of Krakow https://orcid.org/0000-0003-0957-7626

е-mail: <u>tgoral@agh.edu.pl</u> ПРОЦЮК ВАСИЛЬ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу <u>https://orcid.org/0000-0003-0990-5220</u> e-mail: <u>vasyl.protsiuk@nung.edu.ua</u>

ДЕЙНЕГА РУСЛАН

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу <u>https://orcid.org/0000-0003-1141-7672</u> e-mail: <u>deynega2004@ukr.net</u>

ФАФЛЕЙ ОЛЕГ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу https://orcid.org/0000-0002-6415-117X

e-mail: <u>olera32@ukr.net</u>

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВОГО СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СОПЛА ЛАВАЛЯ ТА АЛГОРИТМУ ЙОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Одним із способів охолодження газових потоків є використання сопла Лаваля – пристрою, у якому відбувається прискорення газового потоку до швидкостей, які перевищують швидкість звуку. Проте, при роботі такого сопла, газовий потік дуже чутливий до зміни поперечного перерізу отвору. Наприклад, для зміни числа Маха (М) на 10% (від М=0,9 до М=1) достатньо змінити площу перерізу на 1%, а для зміни від М=0,95 до М=1 – на 0,25 %. Для зміни газодинамічних параметрів у соплі Лаваля застосовуються різноманітні способи та обладнання, але, зазвичай, вони стосуються газотурбінних двигунів. Застосування аналогічних способів та обладнання для охолодження газового потоку малих об'ємів є недоцільним та практично неможливим. Для зміни газо- та термодинамічних параметрів потоку може бути використане сопло Лаваля, яке виготовлене з силікону або гуми. У роботі досліджено газо- та термодинамічні параметри газового потоку, який проходить через сопло. Для цього було створено його тривимірну модель та застосовано імітаційне моделювання. Під час моделювання враховано склад газів, а також тиски і температури на вході та виході сопла. Встановлено, що максимальне число Маха у соплі досягає 1,53, при цьому температура газу знижується з 120 °С до 75 °С. Дослідження також показало нерівномірний розподіл тиску по внутрішніх поверхнях сопла, що впливає на його напруженодеформований стан. З метою можливості регулювання параметрів сопла Лаваля запропоновано автоматизований спосіб, який базується на зміні найменшого поперечного перерізу в залежності від тиску, що дозволяє підтримувати необхідну швидкість газового потоку та знижувати температуру. Сопло виготовляється з гіперпружних матеріалів, що витримують високі температури та є стійкими до зносу. Для проєктування сопел з автоматизованим регулюванням розроблено алгоритм імітаційного моделювання, який дозволяє досліджувати напружено-деформований стан сопла із врахуванням зміни тиску на його внутрішній поверхні. Результати виконаного імітаційного моделювання згідно розробленого алгоритму показали максимальні напруження (0,33 МПа) та переміщення (0,48 мм) у зоні найменшого діаметра сопла. Подальші дослідження передбачають оптимізацію конструкції сопла Лаваля з використанням параметричної оптимізації для досягнення найкращої ефективності його роботи.

Ключові слова: сопло Лаваля, автоматизований спосіб, алгоритм, імітаційне моделювання, число Маха, тиск, температура.

MYKHAILIUK VASYL Ivano-Frankivsk National Technical University Of Oil And Gas TOMASZ GÓRAL AGH University of Krakow PROTSIUK VASYL, DEINEHA RUSLAN, FAFLEI OLEH Ivano-Frankivsk National Technical University Of Oil And Gas

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC METHOD OF ADJUSTING LAVAL NOZZLE PARAMETERS AND ITS SIMULATION ALGORITHM

One of the methods of cooling gas flows is the use of a Laval nozzle - a device in which the gas flow is accelerated to speeds that exceed the speed of sound. However, during the operation of such a nozzle, the gas flow is very sensitive to changes in the cross-section of the opening. For example, to change the Mach number (M) by 10% (from M=0.9 to M=1), it is enough to change the cross-sectional area by 1%, and to change from M=0.95 to M=1 – by 0.25 %. Various methods and equipment are used to change the gas dynamic parameters in the Laval nozzle, but they usually apply to gas turbine engines. The use of similar methods and equipment for cooling the gas flow of small volumes is impractical and practically impossible. A Laval nozzle made of silicone or rubber can be used to change the gas and thermodynamic parameters of the flow. In the paper, the gas and thermodynamic parameters of the gas flow passing through the nozzle were investigated. For this, its three-dimensional model was created and simulation modeling was applied. During modeling, the composition

of gases, as well as pressures and temperatures at the nozzle inlet and outlet are taken into account. It is established that the maximum Mach number in the nozzle reaches 1.53, while the gas temperature decreases from 120 °C to 75 °C. The study also showed an uneven distribution of pressure on the inner surfaces of the nozzle, which affects its stress-deformed state. In order to be able to adjust the parameters of the Laval nozzle, an automated method is proposed, which is based on the change of the smallest cross-section depending on the pressure, which allows maintaining the required gas flow rate and reducing the temperature. The nozzle is made of hyperelastic materials that can withstand high temperatures and are resistant to wear. For the design of nozzles with automated regulation, a simulation modeling algorithm has been developed, which allows studying the stress-strain state of the nozzle, taking into account the change in pressure on its inner surface. The results of the simulated simulation according to the developed algorithm showed the maximum stress (0.33 MPa) and displacement (0.48 mm) in the area of the smallest diameter of the nozzle. Further research involves optimization of the design of the Laval nozzle using parametric optimization to achieve the best efficiency of its operation.

Keywords: Laval nozzle, automated method, algorithm, simulation modeling, Mach number, pressure, temperature.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Подальше Сопло Лаваля – пристрій, у якому відбувається прискорення газового потоку до швидкостей, що перевищують швидкість звуку [1]. Феномен прискорення газу до надзвукових швидкостей в соплі Лаваля був виявлений в кінці XIX ст. експериментальним шляхом. Пізніше це явище знайшло теоретичне пояснення в рамках газової динаміки.

При аналізі руху газу в соплі Лаваля приймаються такі допущення:

- газ вважається ідеальним.

- газовий потік є ізоентропним (тобто має постійну ентропію, сили тертя і дисипативні втрати не враховуються) і адіабатичним (тобто теплота не підводиться і не відводиться).

- газова течія є стаціонарною і одновимірною, тобто в будь-якій фіксованій точці сопла всі параметри потоку постійні в часі і змінюються тільки уздовж осі сопла, причому у всіх точках обраного поперечного перерізу параметри потоку однакові, а вектор швидкості газу всюди паралельний осі симетрії сопла.

- масова витрата газу однакова у всіх поперечних перерізах потоку.

- вісь симетрії сопла є просторовою координатою [1].

Відношення локальної швидкості до локальної швидкості звуку позначається числом Маха, яке також розуміється місцевим, тобто залежним від координати:

$$M = \frac{v}{c}.$$
 (1)

З рівняння стану ідеального газу випливає:

$$\frac{dp}{d\rho} = C^2,\tag{2}$$

де ρ – локальна густина газу,

p – локальний тиск.

З урахуванням цього, а також з урахуванням стаціонарності і одномірності потоку рівняння Ейлера набуває вигляду:

$$v\frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{d\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = -\frac{C^2}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx},\tag{3}$$

що, враховуючи (1), перетворюється в

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{dp}{dx} = -M^2 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx}.$$
(4)

Рівняння (4) є ключовим у даному міркуванні. Розглянемо його в такій формі:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} / \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx} = -M^2.$$
(5)

Величини
$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}$$
 та $\frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx}$ характеризують відносну ступінь змінності по координаті цільності газу і

його швидкості відповідно. Причому рівняння (5) показує, що співвідношення між цими величинами рівне квадрату числа Маха (знак мінус означає протилежну спрямованість змін: при зростанні швидкості густина зменшується). Таким чином, на дозвукових швидкостях (M<1) густина змінюється меншою мірою, ніж швидкість, а на надзвукових (M>1) – навпаки. Як буде видно далі, це і визначає звужуючу-розширюючу форму сопла.

Оскільки масова витрата газу постійна:

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

де А – площа місцевого перетину сопла,

 $ln \rho + ln v \cdot ln A = ln(const)$

диференціюючи обидві частини цього рівняння по *х*, одержуємо:

1 dp 1 dv 1 dA

$$\frac{\overline{\rho} \cdot \overline{dx} + \overline{v} \cdot \overline{dx} + \overline{A} \cdot \overline{dx} = 0$$

Після підстановки з (5) в це рівняння, отримуємо остаточно:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{A}{v} \cdot \frac{dv}{dx} \cdot \left(M^2 - 1\right) \tag{6}$$

Зауважимо, що при збільшенні швидкості газу в соплі знак виразу $\frac{A}{v} \cdot \frac{dv}{dx}$ додатній і, отже, знак похідної $\frac{dA}{dx}$ визначається знаком виразу: $(M^2 - 1)$

Тому можна зробити наступні висновки [1]:

• при дозвуковой швидкості руху газу (M<1), похідна dA/dx<0 – сопло звужується.

• при надзвуковій швидкості руху газу (M>1), похідна dA/dx>0 – сопло розширюється.

• при русі газу зі швидкістю звуку (M=1), похідна dA/dx=0 – площа поперечного перерізу досягає екстремуму, тобто має місце найвужчий переріз сопла, який називається критичним.

Отже, на звуженій, докритичній ділянці сопла рух газу відбувається з дозвуковими швидкостями. У найвужчому, критичному перетині сопла локальна швидкість газу сягає звукової. На розширеній, закритичній ділянці, газовий потік рухається з надзвуковою швидкістю, прискорюючись. Це прискорення відбувається завдяки тому, що хвиля зниження тиску від розширеної порції газу в надзвуковому потоці не встигає розповсюдитися на наступні за нею інші порції. Закон Бернуллі в цих умовах не виконується. Як наслідок цього, маємо корисну роботу.

Необхідно зауважити, що біля критичного перерізу потік дуже чутливий до зміни поперечного перерізу отвору. Так, наприклад, для зміни числа Маха (М) на 10% (від М=0,9 до М=1) достатньо змінити площу перерізу на 1%, а для зміни від М=0,95 до М=1 – на 0,25 %. З цієї причини неможливо підтримувати критичний режим на достатньо довгій ділянці прямої труби (граничний шар, що утворюється за рахунок гальмування газу біля стінок, ніби звужує переріз струменя потоку).

Сопло Лаваля застосовується для зміни газо- та термодинамічних параметрів потоку газу у хімічній, будівельній, сільськогосподарській, цементній, нафтогазовій та інших галузях.

Зважаючи на те, що сьогодні відбувається глобальне потепління, однією із галузей, яка найбільше продукує викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище є – цементна. Зазвичай, викиди пилу цементного виробництва поділяються на організовані та неорганізовані [2]. До організованих джерел викидів пилу відносяться печі, клінкерні холодильники і млини для помолу сировинних матеріалів, цементу та вугілля, а також допоміжне обладнання. Основна частина пилу викидається в атмосферу з обертових печей для випалу портландцементного клінкеру. Джерелами утворення неорганізованих пилових викидів є процеси складування та переробки сировинних матеріалів, палива і клінкеру, а також будь-які транспортні засоби, що використовуються на території виробництва.

У димових газах цементного виробництва наявні: оксиди азоту, діоксид сірки, оксид та діоксид вуглецю, водяна пара [2]. Необхідно зазначити, що до основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води (H₂O), вуглекислий газ (CO₂), закис азоту (N₂O), метан (CH₄), озон (O₃), гексафторид сірки (SF₆), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ).

Відокремлення із димових газів окремих шкідливих компонентів (наприклад, водяної пари, діоксиду вуглецю) сьогодні є одним із найактуальніших завдань, що має на меті сповільнити глобальне потепління. Для цього використовують існуючі та розробляються нові технології, але обладнання, яке при цьому використовується, є великогабаритним, дороговартнісним, енергозатратним та потребує кваліфікованого обслуговування.

У роботі [3], для відокремлення із димових газів різноманітних підриємств шкідливих компонентів, пропонується використовувати багатосопловий пристрій (набори сопел Лаваля), у якому відбувається охолодження газової суміші. Внаслідок цього водяна пара перетворюється на дрібнодисперсні краплини рідини. Отримана газорідинна суміш поступає у буферну камеру, а звідти надходить на сепаратори, у яких відбувається уловлювання краплинної рідини та механічних частинок. Необхідно зауважити, що у наявному конденсаті пари димових газів будуть наявними пил та механічні домішки. Їх можна утилізувати або за можливості повторно використати у технологічному процесі. Відділення рідини і механічних домішок відбувається за високих температур (+120 °С...+160 °С). При цьому енерготвитрати на цей процес є мінімальними.

Аналіз досліджень та публікацій

Сопла зі змінними геометричними параметрами найчастіше використовуються у газотурбінних двигунах. Хоча їх конструкції дозволяють змінювати газодинамічні параметри потоку, проте у них використовується багато рухомих елементів складної конфігурації, що призводить до збільшення їх габаритів та маси. Використання аналогічних за конструкцією сопел Лаваля для охолодження потоку газу малих об'ємів є недоцільним і практично неможливим.

Що стосується іншого обладнання, особливості елементів якого можуть бути застосовані у конструкції сопла Лаваля з метою регулювання його параметрів, - проаналізовано конструкцію регульованого ежектора, будова та принцип дії якого описано у роботі [4]. Він призначений для пневмотранспортування сипучого матеріалу за допомогою стисненого повітря. Однак і його конструкція після вивчення виявилась недосконалою та не може бути застосована для охолодження газової суміші без відповідного конструктивного доопрацювання.

Одним із варіантів конструкції сопла Лаваля, яке має змогу змінювати параметри газового потоку є сопло, наведене у роботі [5]. Конструкцію цього регульованого сопла Лаваля наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Конструкція регульованого сопла: 1 – еластичне сопло; 2 – корпус; 3 – натискна втулка; 4 – жорстке кільце; 5 – натискна гайка

Принцип керування геометричними параметрами полягає у радіальній деформації еластичного сопла 1 під дією осьового зусилля від зміщення натискної втулки 3, яка переміщується за рахунок натискної гайки 5. Сопло виготовляється із еластичного матеріалу (наприклад гуми, силікону), а корпус та натискна втулка – із жорсткого матеріалу (наприклад сталі).

Проте така конструкція сопла може регулюватись тільки у ручному режимі. Використання даного сопла можливе тільки для регулювання параметрів газового потоку в якому ці параметри є майже постійними.

Формулювання цілей статті

Метою роботи с: розроблення способу автоматизованого регулювання параметрів сопла Лаваля та алгоритму його імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– встановити газо- та термодинамічні параметри газового потоку, що проходить через сопло із врахуванням його складу;

- запропонувати спосіб автоматизованого регулювання параметрів сопла Лаваля;

– розробити алгоритм імітаційного моделювання сопла Лаваля для дослідження його напруженодеформованого стану із врахуванням нерівномірного розподілу тиску по його внутрішніх поверхнях;

– окреслити подальші дослідження сопла Лаваля з врахуванням розробленого способу автоматизованого регулювання його параметрів.

Виклад основного матеріалу

Для автоматизованого регулювання параметрів газового потоку пропонується конструкція сопла, принципову схему якого наведено на рисунку 2.



Рис. 2. Принципова схема регульованого сопла Лаваля: 1 – сопло; 2 – корпус

Принцип роботи пропонованого сопла наступний. Газовий потік рухається із сталою (наперед визначеною) витратою, за якої відбувається забезпечення його охолодження (за певних значень числа Маха). При збільшенні витрати газового потоку відбувається зростання швидкості руху газу, і, як наслідок, зміна швидкості та числа Маха. З метою зрівноваження швидкості руху газового потоку за можливих коливань витрати пропонується конструкція, сопло якої виконано із гіперпружного матеріалу (наприклад, силікону чи гуми). Причому форма та геометричні розміри внутрішньої частини сопла визначені необхідними характеристиками газового потоку, а зовнішня форма та розміри – можуть бути змінені залежно від необхідної степені деформації внутрішнього отвору (у найменшому перерізі сопла). Для цього необхідно змінити жорсткість конструкції сопла у певних його зонах.

Відомо, що під час проходження газового потоку через сопло відбувається зміна тиску по його внутрішній поверхні. З цього випливає, що для вибору та подальшої оптимізації форми та розмірів сопла за допомогою імітаційного моделювання слід враховувати цей нерівномірний розподіл тиску.

Для наглядного відображення зміни газодинамічних параметрів газового потоку (з врахуванням складу газового потоку) проведено імітаційне моделювання роботи сопла Лаваля. Внутрішні розміри та форма сопла використані з попередніх досліджень [6]. Імітаційне моделювання виконане у програмі FlowSimulation [7].

Граничними умовами під час імітаційного моделювання роботи сопла прийнято: тиск на вході у сопло (0,2 МПа); тиск на виході з сопла (тиск навколишнього середовища); склад димового газу цементного виробництва ((азот – 28 %; вода – 11 %; вуглекислий газ – 22 %; кисень – 9 %; повітря – 30 %) [2]; температура газової суміші на вході у сопло 120 °C; температура на виході з сопла 20 °C.

На рисунку 3 показано отримані результати імітаційного моделювання.

Технічні науки



Рис. 3. Результати імітаційного моделювання (розглядається повздовжній переріз сопла): a) – розподіл тиску; б) – розподіл швидкості; в) – число Маха; г) – розподіл температури газового потоку

Отже, згідно рисунку 3, відбувається зменшення тиску у повздовжному перерізі сопла, збільшення швидкості рузу газу, і, як наслідок, числа Маха у найвужчому його перерізі і зниження температури газового потоку із 120 °С на вході у сопло до 75 °С на виході з нього.

Для наглядності розглянемо розподіл тиску по вутрішніх поверхнях сопла (рис. 4).



Рис. 4. Розподіл тиску по внутрішніх поверхнях сопла

На рисунку 5 зоюражено зміну тиску за попередньо побудованою лінією на внутрішній поверхні сопла.



Вісник Хмельницького національного університету, №4, 2024 (339)

Еспортування отриманих результатів зміни тиску на внутрішній поверхні сопла у модуль Simulation програми SolidWorks можливе двома способами: програмно (за ввімкнення окремих налаштувань програми результати розрахунку модуля FlowSimulation [7] переносяться як вхідні дані (навантаження) у модуль Simulation); задання тиску з допомогою рівняння, яке описує його зміну.

Розглянемо другий спосіб. Для його використання у програмі SolidWorks спочатку необхідно створити систему координат (рис. 6). Причому, оскільки у соплі наявні три ділянки, то необхідно створювати три системи координат (їх розташування встановлювати на початку кожної ділянки).



Рис. 6. Створена система координат

Під час задавання навантаження, у нашому випадку – тиску, необхідно вибрати внутрішні поверхні сопла та створені системи координат. Оскільки сопло є осесиметричним, то доцільно використати циліндричну систему координат. Далі задається рівняння, яке описує зміну тиску на внутрішній поверхні сопла. Це рівняння зручно отримати, скориставшись імпортуванням даних, що описують графічну залежність, подану на рисунку 5 з програми FlowSimulation у Excel (рис. 7).



Рис. 7. Зміна тиску на внутрішній поверхні сопла

Рівняння зміни тиску на внутрішній поверхні сопла має вигляд:

y = 6E+14x6 - 1E+14x5 + 8E+12x4 - 2E+11x3 + 3E+09x2 - 1E+07x + 204520. (7) Для отримання більшої величини достовірності апромаксимації доцільно внутрішню поверхню сопла розділити на три окремі ділянки (рис. 8) та визначити для них окремі рівняння.



Рис. 8. Ділянки поверхонь сопла: 1 – перша ділянка; 2 – друга ділянка; 3 – третя ділянка

На рисунку 9-11 показано графічні залежності зміни тиску на окремих ділянках сопла.

(8)

(9)

Технічні науки



Рис. 9. Зміна тиску на внутрішній поверхні сопла на ділянці 1

Отримане рівняння зміни тиску на внутрішній поверхні сопла на ділянці 1 має вигляд: y = -23,101x3 + 531x2 - 4010,5x + 203009.





$$y = -16035x + 120346.$$



Рівняння зміни тиску на внутрішній поверхні сопла на ділянці 3 має вигляд:

$$y = -0.0215x5 + 2.5784x4 - 114.27x3 + 2222.9x2 - 15793x + 89519.$$
(10)

Розрахункову схему сопла зображено на рисунку 12 Прикладання тиску до внутрішніх поверхонь сопла відбувалось згідно рівнянь 2-4. Необхідно зауважити, що у програмі Simulation зміна тиску також відображається на розрахунковій схемі – для прикладу наглядно зображено різні величини стрілок (що відповідає зниженню тиску по внутрішній поверхні сопла на ділянці 1).



Рис. 12. Розрахункова схема сопла

На розрахунковій схемі також вказано закріплення сопла – зафіксовано його дві зовнішні циліндричні поверхні.

Матеріалом сопла для імітаційного моделювання прийнято силікон SKR-788, характеристики якого досліджені у роботі [8]. Для дослідження сопла використано нелінійне дослідження (прикладання навантаження здійснюється покроково та враховано поведінку силікону за допомогою моделі Mooney-Rivlin).

Результати проведеного дослідження наведено на рисунках 13 та 14.



Рис. 13. Розподіл еквівалентних напружень у повздовжньому перерізі сопла



Рис. 14. Переміщення у повздовжньому перерізі сопла

Отже, згідно рисунків 13 та 14, при дії на внутрішні поверхні тиску, що змінюється згідно відповідних рівнянь, максимальні величини еквівалентних напружень виникають у ділянці 2 та становлять 0,33 МПа, а найбільші переміщення складають 0,48 мм у радіальному напрямку. Відбувається збільшення діаметра найменшого поперечного перерізу сопла на 0,96 мм. Це, у свою чергу, при повторному імітаційному моделюванні роботи сопла у модулі FlowSimulation призведе до зміни швидкості руху, і, як наслідок, до зміни газо- та термодинамічних параметрів потоку газу. Проте, при правильному підході до розрахунку таких сопел, змінюючи їх геометричні розміри можна підбирати оптимальні параметри, за яких відбуватиметься найкраще оптимальне охолодження газового потоку за найменших енергозатрат. Мається на увазі, що під час проєктування авторегульованого сопла слід попередньо враховувати його деформацію при розрахунковій витраті газового потоку. У випадку зниження витрати, внутрішній діаметр отвору сопла повинен зменшуватись, забезпечуючи необхідні числа Маха для забезпечення охолодження газового потоку. Та навпаки, при збільшенні витрати газового потоку, діаметр отвору повинен збільшуватись, що у свою чергу, має забезпечувати його роботоздатність.

У подальших дослідженнях планується (за використання параметричної оптимізації) у програмі Simulation розробити алгоритм та оптимізувати конструкцію сопла Лаваля під задані умови роботи.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

З метою встановлення газо- та термодинамічні параметри газового потоку, що проходить через сопло побудовано його тривимірну модель та застосовано імітаційне моделювання. При імітаційному моделюванні враховано склад газового потоку, який відповідає димовим газам цементного виробництва, та тиски і температури на вході та виході із сопла. Встановлено, що при заданих вхідних параметрах моделювання максимальне число Маха у соплі складає 1,53, за якого відбувається зниження температури газового потоку із 120 °C на вході у сопло до 75 °C на виході з нього. У результаті дослідження також отримано розподіл тиску на внутрішніх поверхнях сопла, який є нерівномірним. Цей нерівномірний розподіл впливає на напружено-деформований стан сопла, і його необхідно враховувати під час розроблення конструкцій сопел.

Виходячи з аналізу конструкцій сопел, які мають можливість регулювання геометричних параметрів, запропоновано спосіб автоматизованого регулювання параметрів сопла Лаваля, що базується на зміні його найменшого поперечного перерізу залежно від тиску на внутрішні поверхні сопла. Цей спосіб дозволяє підтримувати необхідну швидкість руху газового потоку при зміні витрати для забезпечення необхідного числа Маха, і, як наслідок, зниження температура. При цьому сопло виготовляється із гіперпружних матеріалів (силікону, гуми), які є стійкі до температур та різних видів зносу.

Оскільки при роботі сопла Лаваля зміна тиску на внутрішніх його поверхнях відбувається нерівномірно, то з метою проєктування сопел з автоматизованим регулюванням розроблено алгоритм імітаційного моделювання для дослідження його напружено-деформованого стану. Згідно алгоритму спочатку будується залежність зміни тиску на внутрішній поверхні сопла, далі будуються залежності зміни тиску для кожної окремої ділянки сопла. Імпортувавши отримані дані з програми FlowSimulation у Excel, отримуються відповідні рівняння зміни тиску для кожної окремої ділянки сопла, які далі заносяться у програму Simulation до вхідних даних (тиску). Виконавши імітаційне моделювання згідно розробленого алгоритму та з врахуванням нелінійної поведінки матеріалу сопла (згідно моделі Mooney-Rivlin) і використання нелінійного дослідження у програмі Simulation встановлено величини максимальних напружень та переміщень. Максимальні напруження (0,33 МПа) та переміщення (0,48 мм) спостерігаються у зоні найменшого діаметра сопла. Необхідно зауважити, що збільшення діаметру найменшого поперечного перерізу сопла збільшується на 0,96 мм.

У подальших дослідженнях необхідно за використання параметричної оптимізації у програмі Simulation розробити алгоритм та оптимізувати конструкцію сопла Лаваля під задані умови для забезпечення найкращої ефективності його роботи.

Література

1. Сопла Лаваля. URL: http://surl.li/zmncdm

2. Плашихін С. В. 9. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. цементна промисловість. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.

3. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку: пат. 152837 Україна: В03С 3/02. №202200306; заявл. 25.01.22, опубл. 19.04.,23, Бюл. № 16. 4 с.

4. Пат. 1255765, СРСР. B65G 53/14, F04F 5/30, Опубликовано: 07.09.1986. URL: https://patents.su/3-1255765-reguliruemyjj-ehzhektor.html.

5. Михайлюк В. В., Лях, М. М., Процюк, В. Р., Дейнега, Р. О., & Витриховський, Є. А. (2022). Розроблення конструкції регульованого сопла Лаваля. Нафтогазова енергетика, (2(38), 85-92. https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92

6. Лях М.М., Михайлюк В.В., Яцишин Т.М., Витриховський Є.А. (2022). Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лаваля 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

7. 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).

8. Mykhailiuk, V., Kryzhanivskyy, Y., Mosora, Y., Deineha, R., Dzienniak, D., Bajda, S., Bembenek, M. (2024). Derivation of Material Constants for Experimental SKR-788 Silicone Samples via Simulation Modeling and Laboratory Testing. Advances in Science and Technology Research Journal, 18(5), 268-276. https://doi.org/10.12913/22998624/19041

References

1. Sopla Lavalia. URL: http://surl.li/zmncdm

^{2.} Plashykhin S. V. 9. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. tsementna promyslovist. Kyiv: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. 96 s.

^{3.} Sposib vydilennia ridyny i mekhanichnykh chastynok z hazovoho potoku: pat. 152837 Ukraina: V03S 3/02. №202200306; zaiavl. 25.01.22, opubl. 19.04.,23, Biul. № 16. 4 s.

4. Pat. 1255765, SRSR. B65G 53/14, F04F 5/30, Opublykovano: 07.09.1986. URL: https://patents.su/3-1255765-reguliruemyjjehzhektor.html.

5. Mykhailiuk V. V., Liakh, M. M., Protsiuk, V. R., Deineha, R. O., & Vytrykhovskyi, Ye. A. (2022). Rozroblennia konstruktsii rehulovanoho sopla Lavalia. Naftohazova enerhetyka, (2(38), 85-92. https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92

6. Liakh M.M., Mykhailiuk V.V., Yatsyshyn T.M., Vytrykhovskyi Ye.A. (2022). Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu. Prykarpatskyi visnyk naukovoho tovarystva imeni Shevchenka. Chyslo, 17(64), 108-117. https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117 7. 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).

8. Mykhailiuk, V., Kryzhanivskyy, Y., Mo

sora, Y., Deineha, R., Dzienniak, D., Bajda, S., Bembenek, M. (2024). Derivation of Material Constants for Experimental SKR-788 Silicone Samples via Simulation Modeling and Laboratory Testing. Advances in Science and Technology Research Journal, 18(5), 268-276. https://doi.org/10.12913/22998624/19041Рецензія