УДК 62-225.864
DOI: 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ РЕГУЛЬОВАНОГО СОПЛА ЛАВАЛЯ

[1]В. В. Михайлюк*, [1]М. М. Лях, [1]В. Р. Процюк, [1]Р. О.Дейнега, [2]Є. А. Витриховський, [1]Р. Б. Стецюк

[1]ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: myhajlyukv@ukr.net

[2]Національний авіаційний університет; м. Київ, вул. Любомира Гузара, 1;
e-mail: stas.vytrihovskiy@gmail.com

Для охолодження потоків газу в різноманітних технологічних процесах використовують різне обладнання, зазвичай теплообмінники. Однак, для роботи теплообмінників необхідне відведення тепла. У статті пропонується використовувати сопло Лаваля, де газовий потік охолоджується за рахунок фізичного явища, при якому швидкість потоку газу перевищує швидкість звуку. Однак параметри газового потоку на вході у сопло не завжди можливо регулювати, що зменшує ефективність роботи сопла Лаваля. Крім того, ефективність сопла значно залежить від зміни швидкості потоку газу у ньому. Попередній аналіз існуючих конструкцій регульованих сопел показав, що вони є складними як у виготовленні, так у експлуатації. Для регулювання параметрів роботи сопла Лаваля пропонується його конструкція із змінним діаметром внутрішнього отвору (критичного перерізу). Таке сопло можна виготовити із еластичного матеріалу, наприклад силікону, та розмістити у спеціальному корпусі, у який вгвинчується притискна гайка. При вгвинчуванні гайки відбувається деформація еластичного сопла як у осьовому, так і у радіальному напрямках. За допомогою імітаційного моделювання визначено геометричні параметри пропонованого еластичного сопла при деформації його у осьовому напрямку на величину 10 мм. Встановлено, що при цьому внутрішній отвір еластичного сопла з діаметра 12 мм зменшується до діаметра 8,54 мм. Для проведення лабораторно-експериментальних досліджень запропонованого сопла розроблено та виготовлено на 3D-принтер і прес-форму, з допомогою якої із силікону SKR-788 вилите еластичне сопло. Також для дослідження сопла виготовлено спеціальний стенд. Провівши вимірювання силіконового сопла встановлено, що його діаметр у критичному перерізі без деформації у осьовому напрямку складає 11,8 мм, а при деформації на величину 10 мм – 8,6 мм.

Ключові слова: імітаційне моделювання; 3D-принтер; деформація; регулювання; газовий потік.

Various equipment, usually heat exchangers, are used to cool gas flows in different technological processes. However, for the operation of heat exchangers, heat removal is necessary. The article suggests using a Laval nozzle, where the gas flow is cooled due to the physical phenomenon in which the gas flow velocity exceeds the speed of sound. However, it is not always possible to adjust the parameters of the gas flow at the nozzle entrance, which reduces the efficiency of the Laval nozzle. In addition, the nozzle efficiency significantly depends on the gas flow rate change in it. A preliminary analysis of existing designs of adjustable nozzles has shown that they are difficult both to manufacture and operate. To adjust the performance parameters of the Laval nozzle, its design with a variable internal hole diameter (critical section) is proposed. Such a nozzle can be made of an elastic material, such as silicone, and placed in a special housing into which a clamping(placing) nut is screwed. When the nut is screwed in, the elastic nozzle is deformed both in the axial and radial directions. With the help of simulation modeling, the geometric parameters of the proposed elastic nozzle were determined when it was deformed in the axial direction by 10 mm. It was established that the inner hole of the elastic nozzle decreases from a diameter of 12 mm to a diameter of 8.54 mm. Also, with the help of simulation modeling, a study of the elastic nozzle was carried out simultaneously with its axial compression by 10 mm and the action of an internal pressure of 1 MPa at the entrance. To carry out laboratory and experimental studies of the proposed nozzle, a mold was developed and manufactured on a 3D printer, with the help of which an elastic nozzle is cast from SKR-788 silicone. Also, a special stand was made for nozzle research. After measuring the silicone nozzle, it was found that its diameter in the critical section without deformation in the axial direction is 11.8 mm, and with a deformation of 10 mm – 8.6 mm.

Key words: simulation modeling; 3D printer; deformation; regulation; gas flow.

Вступ

На багатьох виробничих підприємствах є необхідність змінювати (знижувати) температуру потоку газу, що транспортується трубопровідними системами. Зниження температури газового потоку у більшості випадків сприяє перетворенню водяних парів у дрібнокраплинну рідину, яку можна відділяти за допомогою сепараційного обладнання. Проте параметри газового потоку можуть змінюватись, тому охолоджувальний пристрій повинен бути регульованим, щоб забезпечувалась ефективність його роботи. У нашому випадку для охолодження газового потоку вибрано сопло Лаваля. Під час руху крізь сопло температура газу і тиск зменшуються, а швидкість зростає. В існуючих наукових роботах недостатньо зверталась увага на забезпечення простоти зміни геометричних параметрів цього сопла під час роботи, тому розроблення конструкції регульованого сопла Лаваля для охолодження газового потоку, легкого у виготовленні і зручного в експлуатації, є актуальним.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Надзвукове сопло (сопло Лаваля)– пристрій для прискорення газового потоку, що проходить по ньому до швидкостей, що перевищують швидкість звуку.

$$M > 1,\ \omega > a_{кр},$$

де M – число Маха;

ω – швидкість газового потоку;

$a_{кр}$ – швидкість звуку.

Газ рухається через сопло із прискоренням, тому за малої швидкості, коли густину газу можна вважати незмінною, переріз сопла необхідно зменшувати. При подальшому розширенні газу збільшення швидкості супроводжується помітним зменшенням тиску та, відповідно, густини газу, що частково компенсує зростання швидкості [1]. Процес проходить через таку стадію, за якої густина газу, що розширюється, зменшується обернено пропорційно до швидкості. Як відомо, в цьому перерізі каналу швидкість газового потоку рівна швидкості звуку. Подальше збільшення швидкості супроводжується ще більш прискореним зменшенням густини газового потоку, внаслідок чого, як випливає з рівняння нерозривності потоку, переріз сопла має збільшуватись.

Отже, надзвукове сопло, що призначене для отримання надзвукового газового потоку, повинно складатись зі звужуючої (дозвукової) та розширюючої (надзвукової) частин (рис. 1). У найвужчому місці надзвукового сопла (критичному перерізі) швидкість потоку рівна звуковій [1]. Виділяють три режими руху потоку газу у соплі: $\omega < a_{кр}$ – дозвуковий; $\omega = a_{кр}$ – критичний; $\omega > a_{кр}$ – надзвуковий.

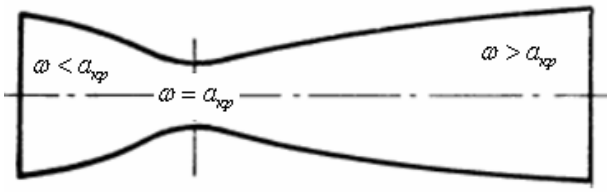
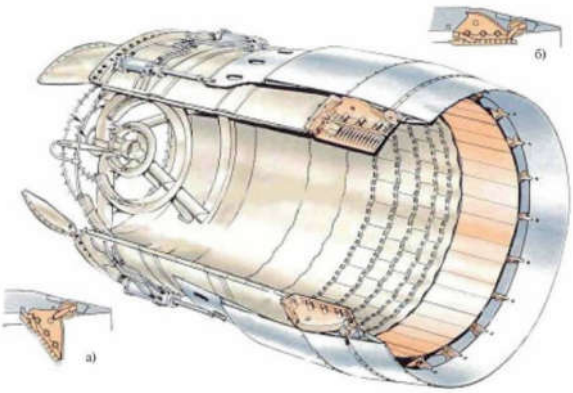


Рисунок 1 – Схема сопла Лаваля

Необхідно зауважити, що біля критичного перерізу потік дуже чуттєвий до зміни поперечного перерізу каналу. Так, наприклад, для зміни числа Маха (М) на 10% (від М=0,9 до М=1) достатньо змінити площу перерізу на 1 %, а для витрати 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).

Існуючі сопла зі змінними геометричними параметрами найчастіше використовуються у газотурбінних двигунах. Зазвичай, такі сопла є великогабаритними та мають складні конструкції. На рисунку 2 показано вихідне регульоване сопло газотурбінного двигуна [2]. На рисунку 3 показано ферму реактивного сопла, а на рисунку 4 – ланку стулок з тягами привода [2].



а – *стулки сопла в положенні «закрито»;*
б – *стулка сопла в положенні «відкрито»*

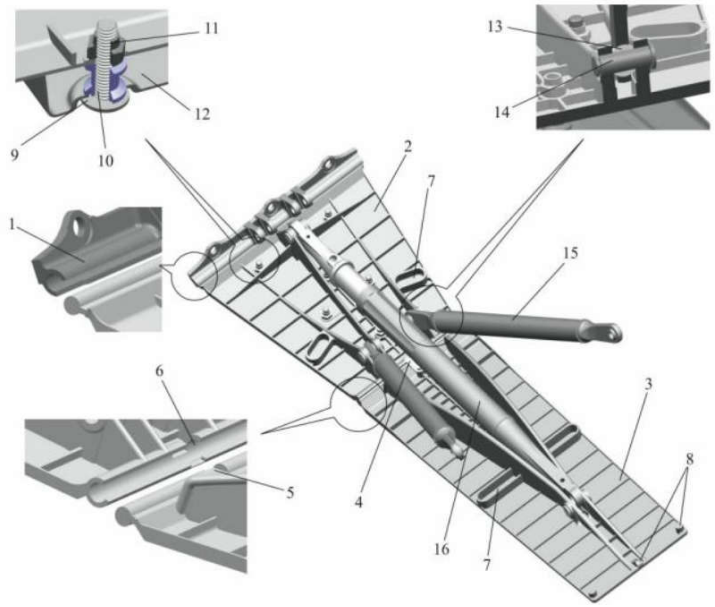
Рисунок 2 – Сопло ступчастого типу

Отже, хоча і конструкції та елементи сопел (рис. 2–4) дають змогу змінювати газодинамічні параметри потоку, проте у них використовується багато рухомих елементів складної кон-

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

1 – фланець сопла;
2 – кільце силове; 3 – крошнейн стулок і тяг ферми;
4 – кроштейнкріплення тяк та качалок; 5 – тяги ферми;
6, 7 – крошнейт кріплення

Рисунок 3 – Ферма сопла



1 – шарнір стулки; 2 – стулка першого ряду; 3 – стулка другого ряду; 4 – фіксатор; 5, 6 – пази фіксатора;
7 – напрямні; 8 – упори; 9 – гвинт; 10 – втулка; 11 – гайка;
12 – екран; 13 – підшипник; 14 – вісь; 15 – тяги привода;
16 – демпфер

Рисунок 4 – Ланка стулок із тягами привода

фігурації, що призводить до збільшення габаритів та маси. Використання таких конструкцій сопел Лаваля для охолодження потоку газу малих об'ємів є недоцільним і практично неможливим.

Що стосується інших конструкцій обладнання, особливості яких можуть бути застосовані до сопла Лаваля, то проаналізовано конструкцію регульованого ежектора [3]. Він призначений для пневмотранспортування сипучого матеріалу за допомогою стисненого повітря. Однак і його конструкція після детального вивчення виявилась недосконалою та не може бути застосована без конструктивного доопрацювання для охолодження газової суміші. Конструкція цього регульованого ежектора з технологічної точки зору є складною у виготовленні.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Зважаючи на складність, великі габаритні розміри та особливості існуючих конструкції регульованих сопел Лаваля, їх практично неможливо використовувати для охолодження газового потоку. Окрім того відомо, що газовий потік у соплі може охолоджуватись лише за певних значень числа Маха. На сталість цього числа впливають параметри потоку на вході у сопло, які не завжди можливо регулювати.

У статті запропоновано конструкцію регульованого сопла та результати його імітаційного моделювання і лабораторно-експериментальних досліджень.

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є розроблення конструкції сопла Лаваля з можливістю плавного (безступеневого) регулювання його геометричних параметрів для забезпечення необхідних газодинамічних характеристик газового потоку.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

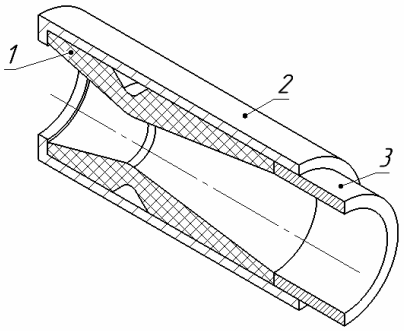
– розробити тривимірну модель конструкції сопла та провести її імітаційне моделювання;

– розробити та надрукувати пресформу за допомогою якої виготовити сопло;

– розробити та виготовити пристрій для дослідження зміни геометричних параметрів регульованого сопла.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для зміни геометричних параметрів сопла Лаваля пропонується конструкція пристрою, яка наведена на рисунку 5. Ця конструкція є спрощеною з метою проведення імітаційного моделювання та складається з сопла Лаваля 1, корпусу 2 та натискної втулки 3. Схему еластичного сопла Лаваля з її основними геометричними параметрами наведено на рисунку 6.



1 – сопло Лаваля; 2 – корпус; 3 – натискна втулка

Рисунок 5 – Конструкція пристрою для зміни геометричних параметрів сопла Лаваля

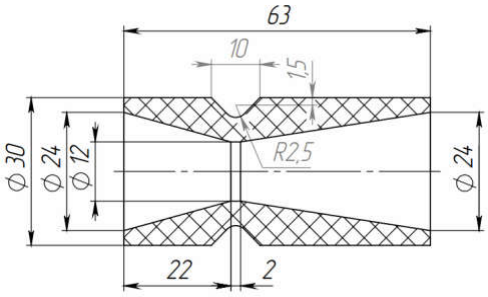


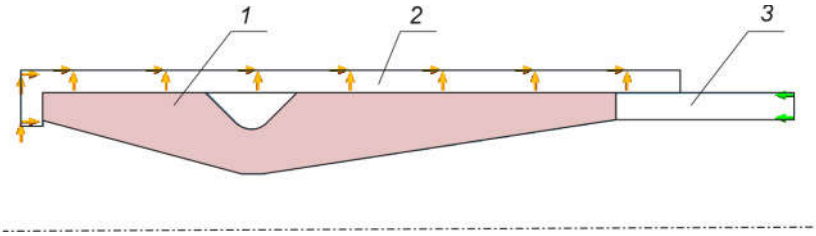
Рисунок 6 – Схема сопла Лаваля

Принцип керування геометричними параметрами полягає у радіальній деформації сопла Лаваля під дією осьового зусилля від переміщення натискної втулки. Для цього сопло виготовляється із еластичного матеріалу (наприклад гуми, силікону), а корпус та натискна втулка – із жорсткого матеріалу (наприклад сталі).

З метою дослідження деформованого стану пропонованої конструкції сопла проведено його імітаційне моделювання. Для цього використано нелінійне дослідження у програмі SolidWorksSimulation. У досліджуваній моделі для сопла використано матеріал з нелінійною поведінкою та проведено покрокове навантаження. Також з метою пришвидшення розрахунку використано осесиметричний тип дослідження.

На рисунку 7 наведено розрахункову схему, відповідно до якої корпус зафіксований, натискна втулка переміщується в осьовому напрямку на величину 10 мм, стискаючи при цьому сопло.

На рисунку 8 наведено розподіл радіальних переміщень у досліджуваній моделі еластичного сопла (у циліндричній систему координат).



1 – сопло; 2 – корпус; 3 – натискна втулка

Рисунок 7 – Розрахункова схема

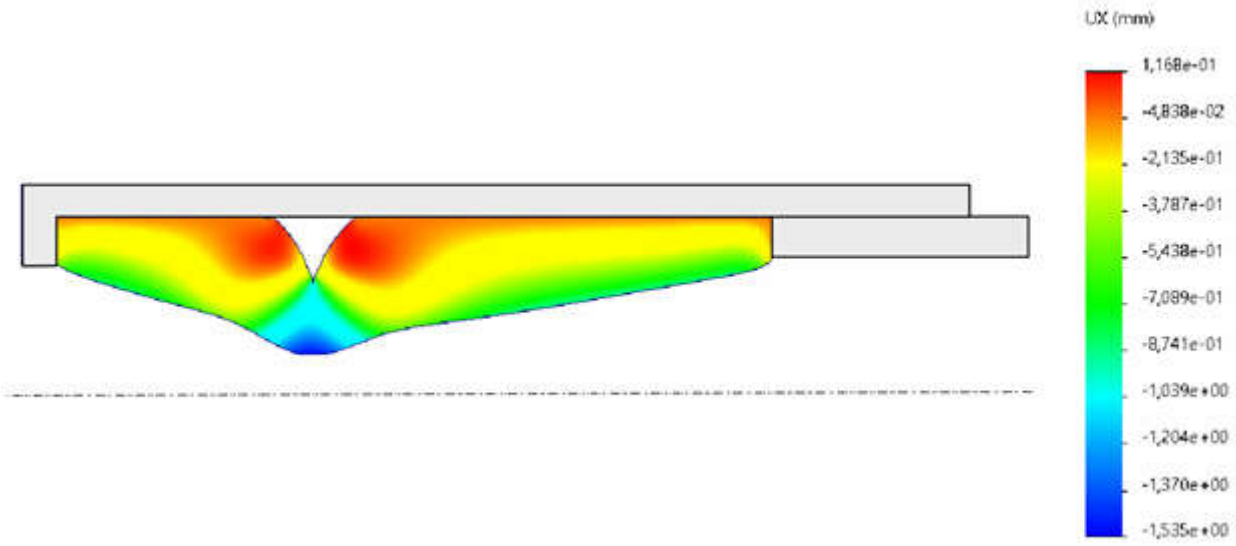
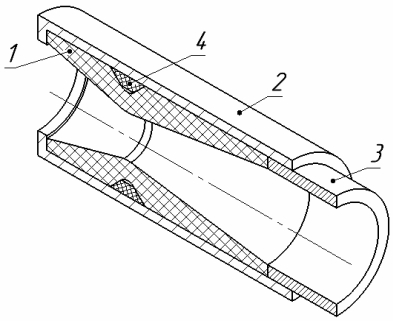


Рисунок 8 – Схема розподілу переміщень у досліджуваній моделі

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

Отже, згідно з отриманими результатами імітаційного моделювання, радіус отвору (в критичному перерізі) сопла при переміщенні притискної втулки на величину 10 мм зменшився на 1,54 мм. Необхідно зауважити, що хоча і отримано зменшення діаметру внутрішнього отвору сопла, проте за такої його конструкції відбувається значна зміна форми вхідного і вихідного конусів сопла. При роботі сопла така зміна форми впливатиме на траєкторії та швидкість руху потоку газу, що є небажаним.

Для усунення цього недоліку в конструкцію еластичного сопла 1 необхідно вставити жорстке кільце 4 (рисунок 9).



1 – сопло Лаваля; 2 – корпус;
3 – натискна втулка; 4 – жорстке кільце

Рисунок 9 – Конструкція регульованого сопла Лаваля із кільцем

На рисунку 10 наведено розподіл радіальних переміщень у досліджуваній моделі еластичного сопла з кільцем (у циліндричній системі координат).

Виходячи із отриманих результатів, наведених на рисунку 11, радіус отвору сопла при переміщенні притискної втулки на величину 10 мм зменшився на 1,74 мм. Отже, у випадку використання кільця деформація вхідного та вихідного конусів є значно меншою, ніж у конструкції сопла без кільця.

Дослідження проводилось у нелінійній постановці. Осьове переміщення притискної втулки було розділено на 13 кроків. У таблиці 1 наведено значення геометричних параметрів сопла на деяких кроках дослідження.

Таблиця 1 – Зміна геометричних параметрів сопла

Крок	Переміщення втулки, мм	Довжина сопла, мм	Діаметр критичного перерізу, мм
0	0	63,0	12
4	3,1	59,9	11,6
8	6,2	56,8	10,26
10	7,7	55,3	9,52
13	10	53	8,54

На рисунку 11 наведено графічні залежності переміщення внутрішньої поверхні сопла на різних кроках дослідження. Також необхідно зауважити, що на рисунку 12 вказано переміщення поверхні від її початкового положення, тобто залежності описують переміщення точок від поверхні при осьовому стиску сопла. Це необхідно врахувати, щоб помилково не прийняти лінії за форму внутрішньої поверхні сопла.

Проте, у досліджуваній конструкції сопла є і недолік – форма сопла змінюється на ділянках контакту його торців із торцем корпусу та торцем натискної втулки. Вплив цієї зміни на роботу сопла Лаваля досліджуватиметься у подальших роботах.

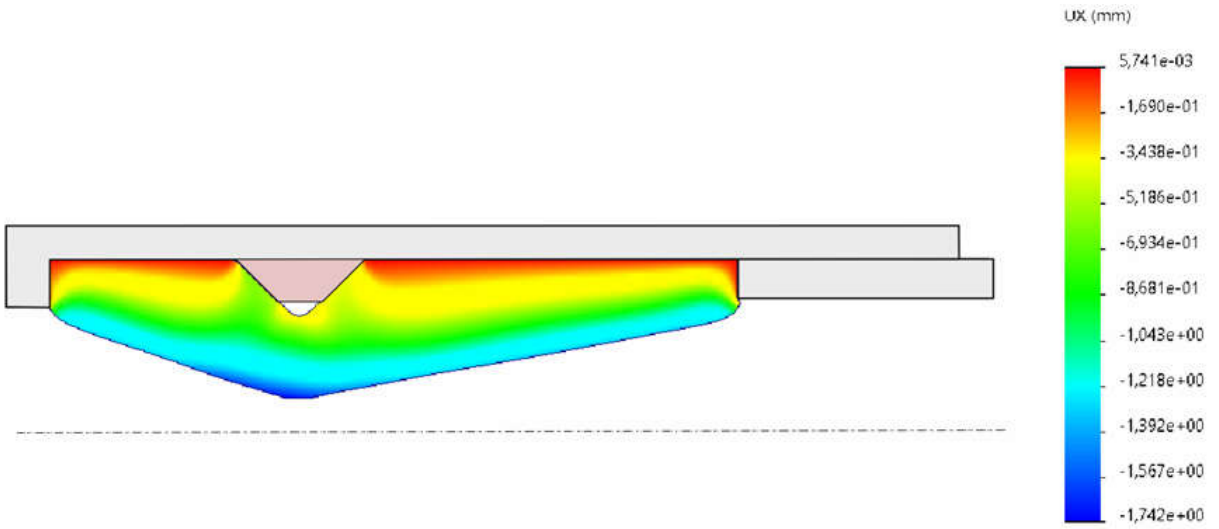


Рисунок 10 – Схема розподілу переміщень у досліджуваній моделі еластичного сопла з кільцем

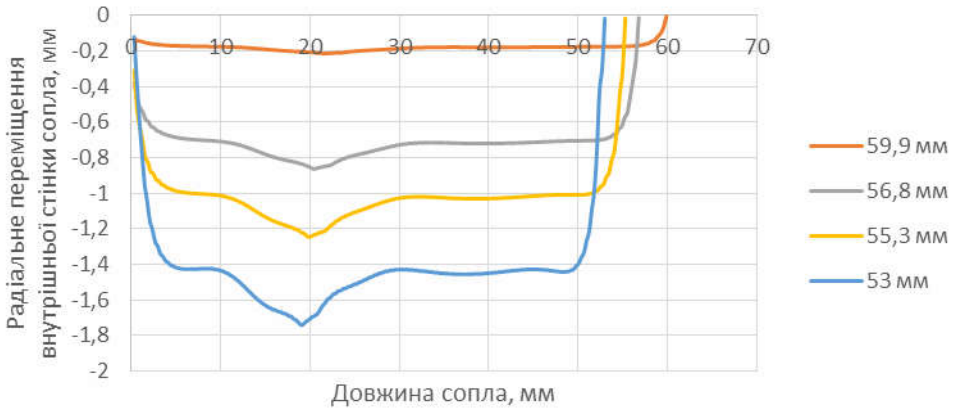


Рисунок 11 – Переміщення внутрішньої поверхні сопла на різних кроках дослідження

а) б)

а – *деталі форми;* б – *форма у зборі*

Рисунок 12 – Пресформа для виготовлення еластичного сопла

Матеріалом для еластичного сопла вибрано силікон SKR-788 [4], а методом його виготовлення – лиття у пресформу, конструкція якої наведено на рисунку 12.

Характеристики силікону SKR-788 наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики силікону SKR-788

Параметр	Значення
Усереднена в'язкість	19000 СПз при 25°С
Колір	білий
Твердість (по Шору А)	30
Відносне видовження при розриві	580 %
Умовна міцність на розрив	3,5 МПа
Співвідношення компонентів (силікон:каталізатор)	100 : 2
Лінійна усадка	0,3 %
Температура експлуатації	- 60 +250 °С
Густина	1,1 г/см^3 при 25°С
Основа каталізатора	Олово

Виготовлені деталі еластичного сопла із силікону SKR-788 зображено на рисунку 13. Сопло зі змонтованим жорстким кільцем наведено на рисунку 14.

Для досліджень зміни геометричних розмірів запропонованого регульованого сопла із встановленим додатковим кільцем розроблено пристрій, деталі якого виготовлено за допомогою 3D-принтера (рис. 15) [5, 6].

Особливістю цього пристрою є те, що з метою уникнення колового переміщення силіконового сопла 1 під час загвинчування натискної гайки 5, застосовано кільце 3, яке входить у пази виконані у корпусі 2.

Виміряний діаметр виготовленого еластичного сопла у критичному перерізі без стискання у осьовому напрямку складає 11,8 мм, а при стисненні на величину 10 мм – 8,6 мм. Отже, радіальне переміщення еластичного сопла у критичному перерізі складає 1,6 мм.

Розбіжність між результатами, отриманими імітаційним моделювання та виміряними експериментально складає 7,5 %.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

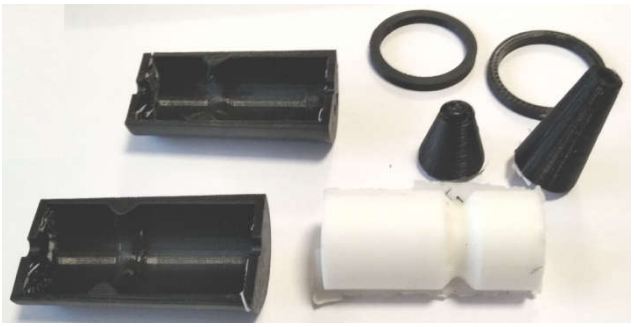


Рисунок 13 – Вилите сопло та пресформа

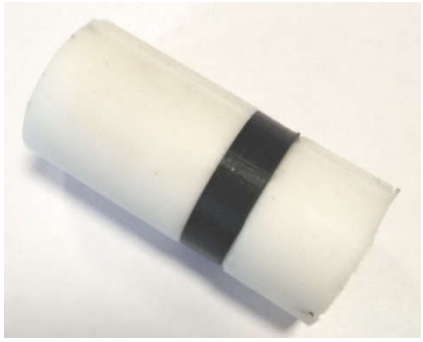
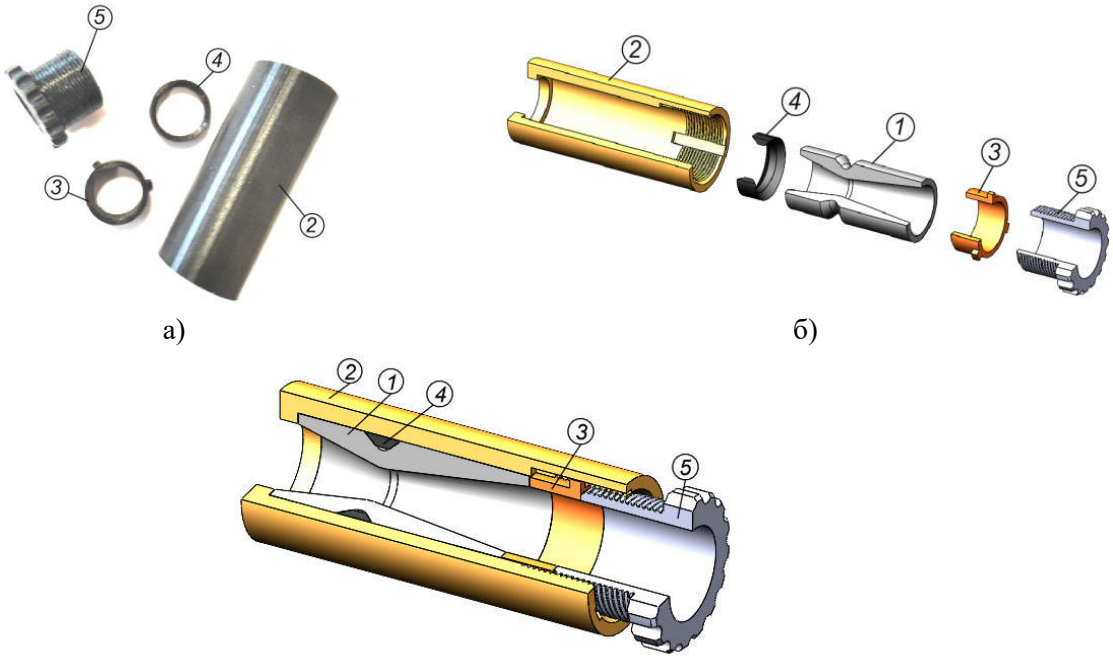


Рисунок 14 – Сопло зі встановленим на зовнішній поверхні жорстким кільцем



а – *надруковані на 3D-принтері деталі;* б – *3D-модель подетально;* в – *3D-модель у зборі*
1 – еластичне сопло; 2 – корпус; 3 – натискна втулка; 4– жорстке кільце; 5 – натискна гайка

Рисунок 15 – Конструкція стенду для дослідження зміни герметричних розмірів сопла

Висновки

Розроблено тривимірну модель пропонованої конструкції сопла у програмі SolidWorks та за допомогою імітаційного моделювання визначено її деформований стан. Встановлено, що при осьовому стиску сопла на величину 10 мм діаметр отвору у його критичному перерізі зменшується із 12 мм до 8,54 мм.

Зі силікону SKR-788 вилито сопло у попередньо розроблену та виготовлену за допомогою 3D-принтера пресформу.

Для проведення дослідження зміни геометричних параметрів виготовленого сопла розроблено та надруковано на 3D-принтері спеціальний пристрій. За результатами проведених досліджень за допомогою цього пристрою встановлено розміри критичного перерізу сопла: діаметр без стискання у осьовому напрямку складає 11,8 мм, а при стисканні на величину 10 мм – 8,6 мм.

Література

1. Абрамович Г.И. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: учеб. руководство для втузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит, 1991. 600 с.

2. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006.

3. https://patents.su/3-1255765-reguliruemyjj-ehzhektor.html

4. https://silikoni.com.ua/ua/molding_silicone/skr-788-silikon-dlya-form

5. Михайлюк В., Ердей З., Джус А., Дічюк В., Родіч В. Проектування та 3D-прототипування: посібник. Івано-Франківськ: Фоліант, 2022. 105 с.

6. Bembenek M., Gazda W., Михайлюк В. В., Рудейченко О. О., & Дейнега Р. О. Аналіз можливості вдосконалення 3D-друку обертових елементів методом FDM. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. №1(52). С. 73–81. https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-73-81

References

1. Abramovich G.I. Prikladnaya gazovaya dinamika. V 2 ch. Ch. 1: ucheb. M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit, 1991. 600 p. [in Russian]

2. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinnyie dvigateli. Perm: OAO «Aviadvigatel», 2006. .[in Russian]

3. https://patents.su/3-1255765-reguliruemyjj-ehzhektor.html. [in Russian]

4. https://silikoni.com.ua/ua/molding_silicone/skr-788-silikon-dlya-form.[in Russian]

5. Mykhailiuk V., Erdei Z., Dzhus A., Dichiuk V., Rodich V. Proektuvanniata 3D-prototypuvannia. Ivano-Frankivsk: Foliant, 2022. 105 p. [in Ukrainian]

6. Bembenek M., Gazda W., Mykhailiuk V. V., Rudeichenko O. O., Deineha R. O. Analiz mozhlyvosti vdoskonalennia 3D-druku obertovykh elementiv metodom FDM. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2022. No 1(52). P. 73–81. https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-73-81. [in Ukrainian]