Розділ четвертий

Виробничий потенціал, сфера послуг та екологічна складова їх сталого розвитку: промисловість, видавництво, поліграфія, туризм, готельно-ресторанна справа, екологія

DOI: 10.61718/mon202511.04

Фафлей О. Я.
Кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6415-117X
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Михайлюк В. В.
Кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0002-3329-2068
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Витвицький В. В.
Кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0003-3682-1612
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Дейнега Р. О.
Кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1141-7672
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Волошин Ю. Д.
Кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0002-0582-1778
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

4.1. Розроблення обладнання для охолодження промислових газоподібних відходів

Однією з промислових галузей, яка характеризується найбільшим рівнем викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, є цементна промисловість. У складі димових газів, що утворюються під час виробництва цементу, містяться оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), оксид і діоксид вуглецю (CO, CO_2), а також значна кількість водяної пари [1]. Відомо, що до основних парникових газів атмосфери Землі належать водяна пара (H_2O), вуглекислий газ (CO_2), закис азоту (N_2O), метан (CH_4), озон (O_3), гексафторид сірки (SF_6), гідрофторвуглецеві (ГФВ) та перфторвуглецеві сполуки (ПФВ). Їх накопичення спричиняє посилення парникового ефекту та зміну кліматичних умов планети.

Сьогодні відокремлення окремих компонентів димових газів промислових підприємств – таких як водяна пара, діоксид вуглецю та механічні домішки – є одним із найактуальніших завдань екологічної інженерії. Реалізація таких процесів сприяє зменшенню техногенного навантаження на атмосферу та є важливим кроком у боротьбі з глобальним потеплінням.

У роботі [2] запропоновано застосування багатосоплового пристрою, що являє собою набір сопел Лаваля, для відокремлення шкідливих компонентів із димових газів різних промислових підприємств. У цьому пристрої відбувається охолодження газової суміші, внаслідок чого водяна пара конденсується у дрібнодисперсні краплі рідини. Отримана газорідинна суміш потрапляє спочатку до буферної камери, а потім — до сепараторів, де здійснюється уловлювання краплинної вологи та механічних домішок. Слід зазначити, що конденсат димових газів містить пилові частинки та тверді включення, які можуть бути утилізовані або повторно використані у технологічному процесі за відповідних умов. Процес відділення рідкої та твердої фази відбувається за високих температур (+120…+160 °C), при цьому енергетичні витрати залишаються мінімальними, що робить метод технологічно та економічно ефективним.

Для дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лаваля на зміну температури газового потоку було створено його параметричну модель у програмному середовищі SolidWorks. Розроблена модель дала змогу визначати зміну температури газового середовища під час проходження через сопло та виконувати серію імітаційних розрахунків із високою точністю. Завдяки параметричному підходу стало можливим оперативно

змінювати геометричні розміри та форму сопла, зберігаючи при цьому єдиний алгоритм розрахунку в модулі Flow Simulation. Це суттєво скоротило час на підготовку та проведення серії чисельних експериментів. На рисунку 1 наведено форми конструкцій сопел, що використовувалися для дослідження.

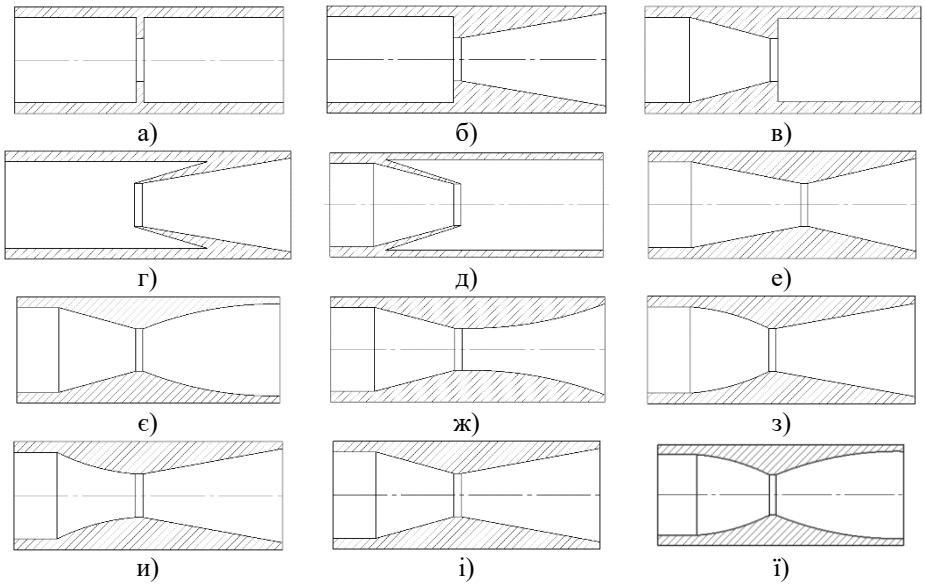


Рис.1. Досліджувані форми конструкції сопел

На рисунку 2 зображено креслення одного із сопел з основними розмірами, які є однаковими для всіх інших сопел.

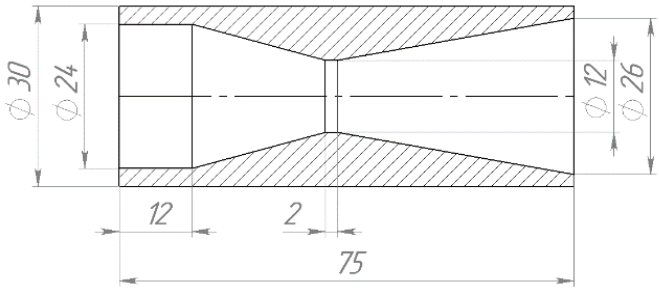


Рис. 2. Креслення сопла з вказаними основними розмірами, які однакові для всіх сопел

Вхідними даними для моделювання прийнято:
– середовище (водяна пара (70 %) + вуглекислий газ (30 %);
– тиск на вході сопла – 1,5 атм;
• температура середовища 100 ^{0}C;
• витрата середовища – 0,06 м^3/с;
• шорсткість внутрішніх поверхонь – Ra12,5.

На рисунку 3 представлено тривимірну модель сопла 2, розташовану між вхідним 1 та вихідним 3 патрубками. Використання патрубків у моделі забезпечує підвищення точності результатів моделювання, оскільки граничні умови прикладаються на більшій відстані від досліджуваної ділянки — сопла 2, що мінімізує вплив крайових ефектів на розрахункову область.

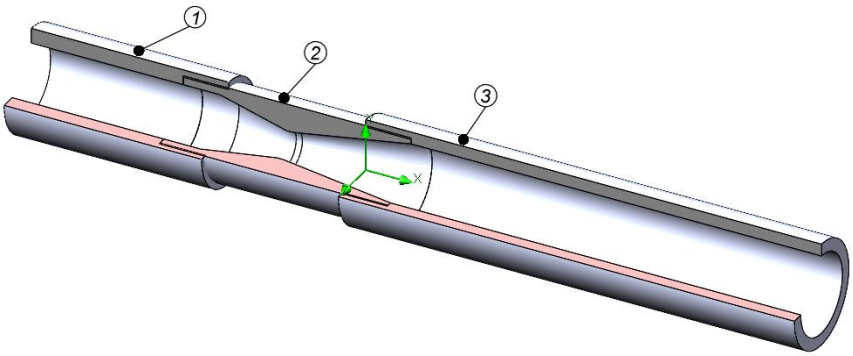


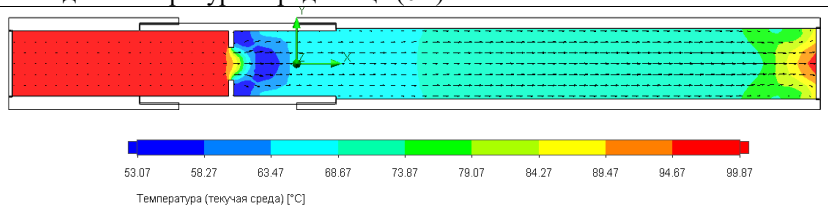
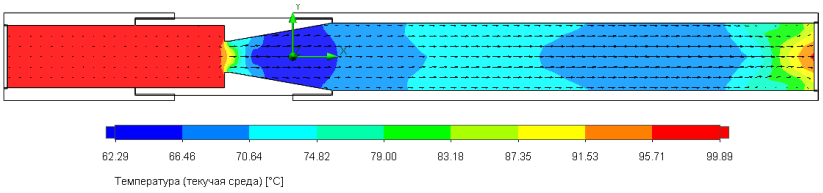
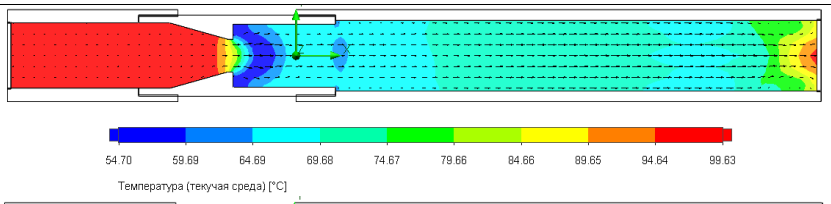
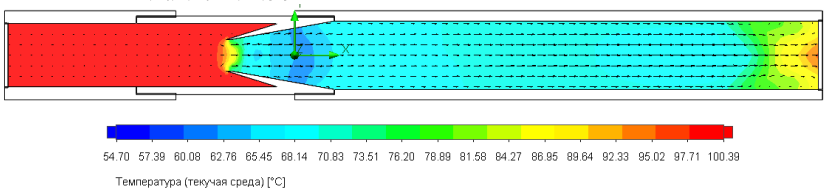
Рис. 3. Тривимірна модель для дослідження
1 – вхідний патрубок; 2 – сопло; 3 – вихідний патрубок

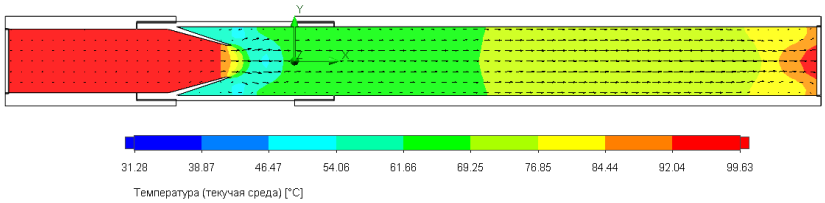
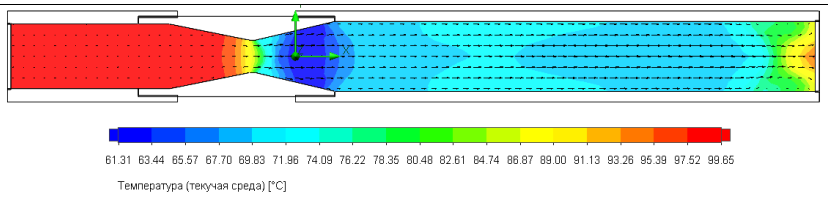
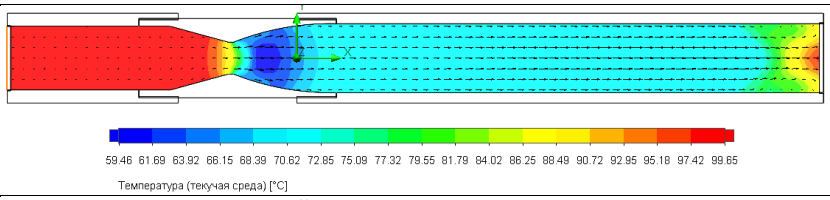
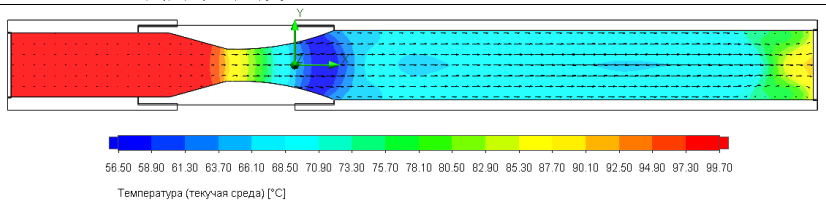
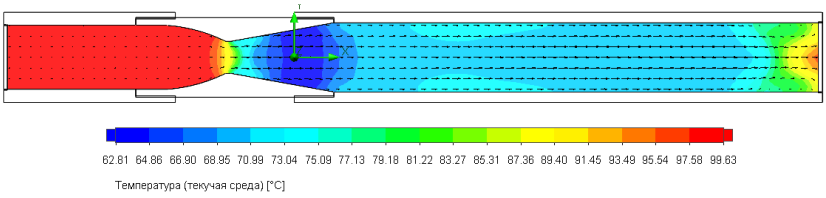
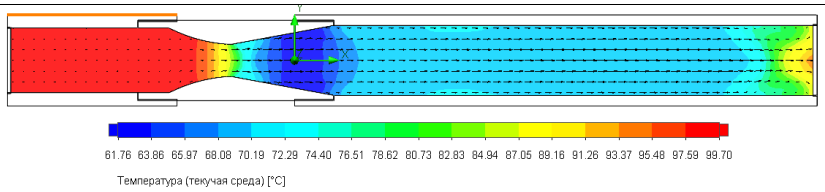
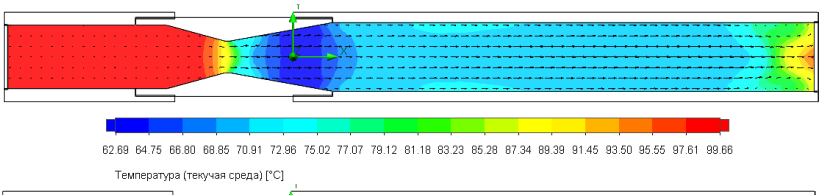
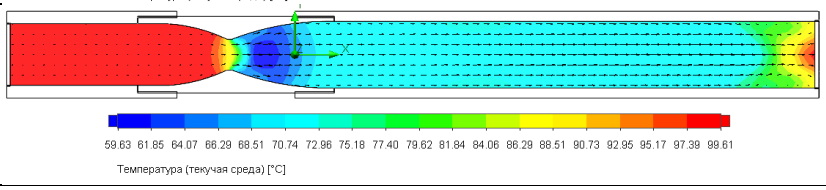
Нижче подано результати імітаційного моделювання для досліджуваних варіантів конструкцій сопел. Слід зазначити, що серед усіх отриманих даних подальший аналіз зосереджено на одному з найважливіших для практичного використання параметрів – температурі, яка змінюється вздовж довжини потоку газового середовища.

Для зручності сприйняття та порівняння результати узагальнено у таблиці 1.

Таблиця 1

Розподіл температури по довжині газового потоку для сопел різної форми

Сопло	Розподіл температури середовища (0С)
А	
Б	
В	
Г	

Д	
Е	
Є	
Ж	
З	
И	
І	
Ї	

Результати моделювання демонструють, що всі розглянуті конструкції сопел Лаваля забезпечують зниження температури газового потоку з приблизно 100 ^{0}C до 60^{0}C. Це охолодження відбувається завдяки досягненню швидкості потоку, що перевищує швидкість звуку (число Маха >)

Аналіз ефективності охолодження та температурних зон у соплах (таблиця 1) дозволяє об'єднати сопла в групи.

Вплив форми сопла на температурні зони

1. Сопла з розширювальною частиною (Б, Е, З, И, І): У цих конструкціях зона найнижчої температури розташована саме у частині, що розширюється (дифузорі). Довжина цієї критичної зони залежить від форми вхідної частини сопла.
2. Сопла з найменшим ефектом (Г, Д): Ці сопла демонструють найменший загальний ефект охолодження, причому найнижчі температури фіксуються лише в локальних малих зонах.
3. Сопла з вираженим охолодженням на виході (Ж): У конструкції Ж найнижча температура спостерігається безпосередньо на виході з сопла і на початку вихідного патрубка.
4. Схожі конструкції (Є, Ї): Зміни температури на виході з сопел Є та Ї є дуже подібними, що свідчить про незначний вплив вхідної частини на температурні зони на виході.

Загальні температурні характеристики

- Зона максимального пониження температури (близько 60^0C) є доволі незначною за довжиною.
- Після пікового охолодження слідує довша зона стабілізації температури у межах 70-80^0C.
- Далі за цією зоною спостерігається підвищення температури середовища.

Вимоги до ефективної конструкції

- Найбільша довжина зони з найнижчою температурою досягається у сопел, що мають конічний або випуклий дифузор на виході.
- Сопла з різкими переходами на вході створюють значний опір руху газового середовища, що знижує загальну ефективність.
- Для оптимального охолодження необхідно, щоб швидкість потоку незначно перевищувала швидкість звуку (Ma > 1).

Оскільки під час роботи обладнання параметри газового потоку, зокрема витрата та температура, можуть змінюватися, для забезпечення стабільної працездатності запропоновано конструкцію сопла Лаваля зі змінним поперечним перерізом. Іншими словами, розроблено регульовану конструкцію сопла, що дозволяє адаптувати його до різних режимів руху газового потоку.

Для дослідження пропонованої конструкції сопла пропонується дослідити її за допомогою імітаційного моделювання та підтвердити роботоздатність дослідженням виготовленого натурного зразка. Для виготовлення зразка вибрано ливарний силікон на олов'яному каталізаторі SKR-788 [3].

Для встановлення механічних характеристик цього силікону розроблено спосіб виготовлення дослідних зразків. Для кращого відділення силікону із форми використано воскову розділову пасту Release Wax [4]. Для дослідження властивостей силікону виготовлено дослідні зразоки за розмірами, наведеними на рисунку 4.

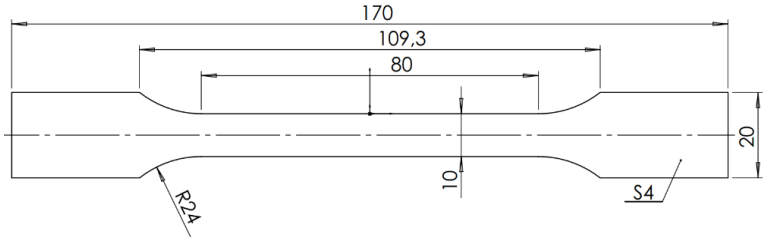


Рис. 4. Розміри дослідного зразка

Для виготовлення дослідного зразка була створена спеціальна форма з фанери, яка складається з окремих елементів і може збиратися в одну велику форму, що дозволяє одночасно заливати декілька зразків. Це важливо, оскільки при одночасному виготовленні кількох зразків вони отримують однакові властивості, адже основа та каталізатор розведені у однаковій пропорції.

На першому етапі дослідження для запобігання прилипання силікону до елементів форми застосовували поліетиленову прокладку. Змішування основи і каталізатора проводили у відкритій посудині за допомогою пластикової лопатки, а заливання силікону виконували у відкриту форму, яку потім закривали поліетиленовою прокладкою та елементом форми. Після 24 годин зразки були вилучені з форми. При цьому виявлено дефекти: зовнішня поверхня мала хвилястість (через наявність повітря під прокладкою та її зминання), а внутрішня структура була неоднорідною через потрапляння повітря під час змішування.

Наступні зразки виготовляли аналогічним способом, але без поліетиленових прокладок; замість них застосовували воскову розділювальну пасту. Однак це не забезпечило однорідну внутрішню структуру матеріалу.

На наступному етапі частину елементів фанерної форми замінили на елементи з оргскла (акрилу). Це забезпечило високу якість зовнішньої поверхні зразка завдяки меншій шорсткості акрилу та дозволило спостерігати процес заливання силікону в форму. Проте навіть із застосуванням оргскла не вдалося отримати однорідну внутрішню структуру дослідного зразка.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано новий метод змішування основи з каталізатором, що передбачає використання шнека, який приводиться в обертання двигуном, а заповнення форми здійснюється через циліндр. Змішування основи з каталізатором проводилося безпосередньо у циліндрі, що забезпечувало більш рівномірне поєднання компонентів.

Завдяки цьому новому підходу виготовлено серію дослідних зразків, у яких відсутні зовнішні та внутрішні дефекти, що спостерігалися у попередніх експериментах. Один із зразків, виготовлених за цією методикою, наведено на рисунку 5.

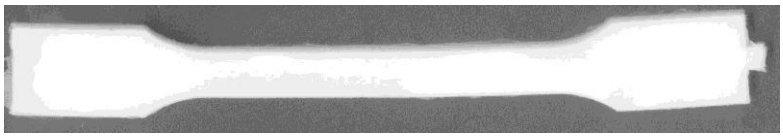


Рис. 5. Зразок виготовлений із силікону без дефектів

Виготовлена за допомогою розробленого методу серія дослідних зразків із силікону SKR-788, відмінності між якими полягають у співвідношенні основи та каталізатора (табл. 2), досліджена для встановлення механічних характеристик на на випробувальній машині Instron 4500 (рис. 6).

Таблиця 2

Позначення досліджуваних зразків та співвідношення основа/каталізатор

№ з/п	ID зразка	Співвідношення основа/каталізатор
1	1_1	90:2
2	1_2	
3	1_3	
4	2_1	100:3
5	2_2	
6	2_3	
7	2_4	

У результаті досліджень було встановлено: величину прикладеного навантаження, тривалість навантаження, величину розтягу, напруження, деформації.

Рис. 6. Випробувальна машина Instron 4500

Отримані результати досліджень скомпільовані у файл формату .txt, який експортовано до програми Ansys Workbench, за допомогою якої встановлено константи силікону SKR-788 для трипараметричної моделі Муні-Рівліна (табл. 2).

Таблиця 3
Константи силікону SKR-788 трипараметричної моделі Муні-Рівліна

Параметр	Розмір	одиниця
Матеріальна константа C_{10}	−1.0335E+05	Pa
Константа матеріалу C_{00}	5,7534E+05	
Матеріальна константа C_{11}	93309	

Для верифікації отриманих констант силікону SKR-788 проведено імітаційне моделювання дослідних зразків у програмі Ansys Workbench. При імітаційному моделюванні застосовувалася розрахункова схема, що відтворює умови тестування зразків на установці Instron 4500. Встановлено, що максимальне переміщення досліджуваного зразка складає 138,4 мм, а максимальне нормальне напруження — 2,64 МПа. Порівняння результатів випробувань на Instron 4500 із даними імітаційного моделювання показало розбіжність до 7%.

Досліджено також вплив співвідношення основи та каталізатора (90:2 та 100:3) для силікону SKR-788 та встановлено, що зміна співвідношення основа/каталізатор практично не впливає на механічні властивості матеріалу, проте має значний вплив на час затвердіння силікону.

Хоча конструкції та окремі елементи сопел, описані у працях [5, 6, 7], дозволяють змінювати газодинамічні параметри потоку, їхня реалізація передбачає використання значної кількості рухомих деталей складної форми. Це, у свою чергу, призводить до збільшення маси, габаритів і конструкційної складності таких систем. Застосування подібних сопел Лаваля для охолодження газових потоків малих об'ємів є недоцільним і технічно ускладненим.

Як зазначалося раніше, для регулювання геометричних параметрів сопла Лаваля запропоновано відповідну конструкцію пристрою, представлену на рисунку 7. Ця конструкція виконана у спрощеному вигляді для проведення імітаційного моделювання та включає сопло Лаваля 1, корпус 2 і натискну втулку 3.

Схема еластичного сопла Лаваля наведена на рисунку 8.

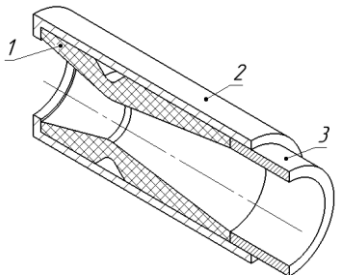


Рис. 7. Конструкція пристрою для зміни геометричних параметрів сопла Лаваля
1 – сопло Лаваля; 2 – корпус;
3 – натискна втулка

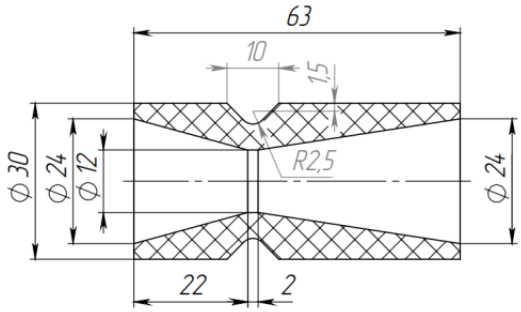


Рис. 8. Схема сопла Лаваля

Принцип регулювання геометричних параметрів сопла Лаваля полягає в радіальній деформації сопла під дією осьового зусилля, що створюється переміщенням натискної втулки. Для цього сопло виготовляється з еластичного матеріалу (наприклад, гуми або силікону), тоді як корпус і натискна втулка виконані з жорсткого матеріалу (наприклад, сталі).

Для дослідження деформованого стану запропонованої конструкції проведено імітаційне моделювання. Сопло моделювалося з урахуванням нелінійної поведінки матеріалу, а навантаження прикладалося покроково. Для прискорення розрахунків застосовано осесиметричний тип моделювання, а весь аналіз виконано у нелінійній постановці. Осьове переміщення натискної втулки розбито на 13 кроків.

На рисунку 9 наведено розрахункову схему: корпус зафіксований, а натискна втулка переміщується в осьовому напрямку на 10 мм, стискаючи при цьому сопло.

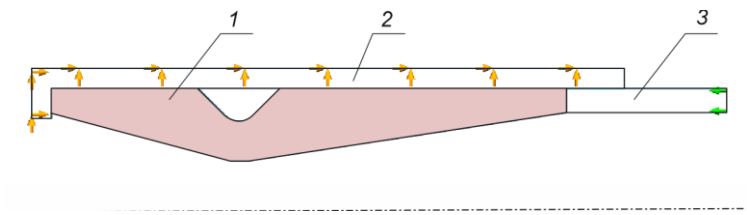


Рис. 9. Розрахункова схема
1 – сопло; 2 – корпус; 3 – натискна втулка

Згідно з результатами імітаційного моделювання, при осьовому переміщенні натискної втулки на 10 мм радіус внутрішнього отвору сопла в критичному перерізі зменшився на 1,54 мм. Слід відзначити, що незважаючи на досягнуте зменшення діаметру, така конструкція спричиняє значну зміну форми вхідного та вихідного конусів сопла. Під час роботи це може негативно впливати на траєкторію та швидкість потоку газу, що є небажаним ефектом. Для усунення цієї проблеми в конструкцію еластичного сопла 1 було введено жорстке кільце 4, як показано на рисунку 10.

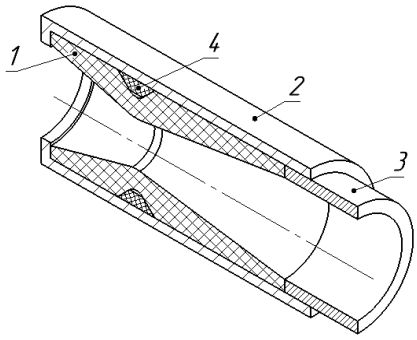


Рис. 10. Конструкція регульованого сопла Лаваля із жорстким кільцем
1 – сопло Лаваля; 2 – корпус; 3 – натискна втулка; 4 – жорстке кільце

Згідно з отриманими результатами, при переміщенні натискної втулки на 10 мм радіус внутрішнього отвору сопла зменшився на 1,74 мм. Таким чином, при використанні жорсткого кільця деформація вхідного та вихідного конусів значно менша, ніж у конструкції сопла без кільця.

На рисунку 11 наведено графічні залежності переміщення внутрішньої поверхні сопла на різних кроках дослідження. Варто зазначити, що на рисунку показані переміщення поверхні від її початкового положення, тобто графіки відображають переміщення точок поверхні при осьовому стиску сопла.

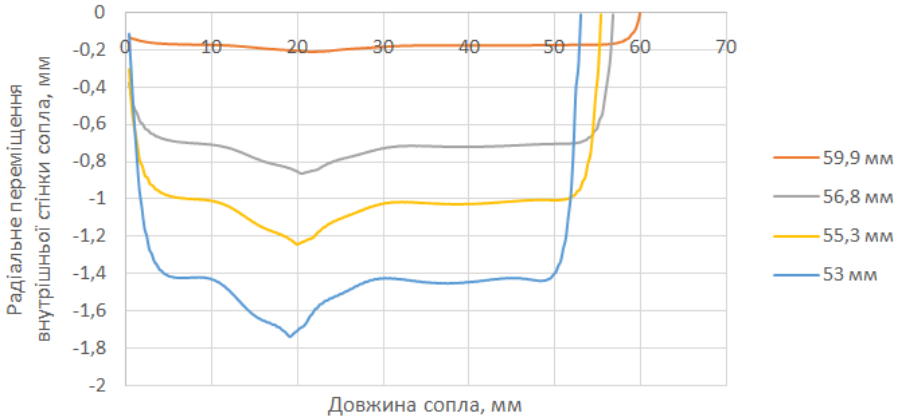


Рис. 11. Переміщення внутрішньої поверхні сопла на різних кроках дослідження

Виготовлено деталі еластичного сопла із силікону SKR-788 (рис 12). Сопло зі змонтованим на його поверзні жорстким кільцем показано на рисунку 13.

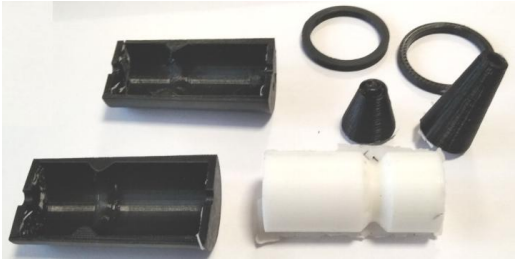


Рис.12. Вилите сопло та пресформа

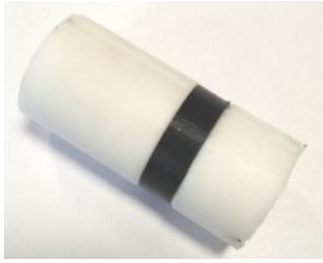
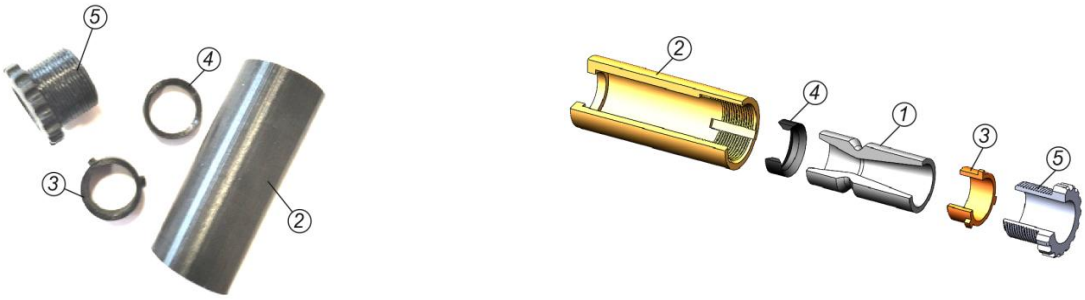


Рис. 13. Сопло зі встановленим на зовнішній поверхні жорстким кільцем

Для дослідження зміни геометричних розмірів запропонованого регульованого сопла з додатковим кільцем було створено експериментальний пристрій, деталі якого виготовлені за допомогою 3D-принтера (рис. 14).



а) б)

Рис. 14. Конструкція стенду для дослідження зміни герметричних розмірів сопла
а) – деталі; б) – 3D-модель подетально; 1 – еластичне сопло; 2 – корпус;
3 – натискна втулка; 4– жорстке кільце; 5 – натискна гайка

Ключова особливість конструкції цього пристрою полягає у використанні фіксуючого кільця (3), яке входить у пази корпусу (2). Це запобігає обертанню (коловому переміщенню) силіконового сопла (1), коли затягується натискна гайка (5). Експериментальні вимірювання підтвердили очікувану еластичність сопла: його критичний діаметр зменшився з 11,8мм (у вільному стані) до 8,6мм при осьовому стисненні на 10мм. Це відповідає радіальному переміщенню (зміні радіуса) на 1,6мм. Важливо, що результати імітаційного моделювання та експериментальних вимірювань узгоджуються з високою точністю, демонструючи розбіжність лише 7,5%.

Для автоматизованого регулювання параметрів газового потоку запропоновано конструкцію сопла, принципова схема якої представлена на рисунку 15.

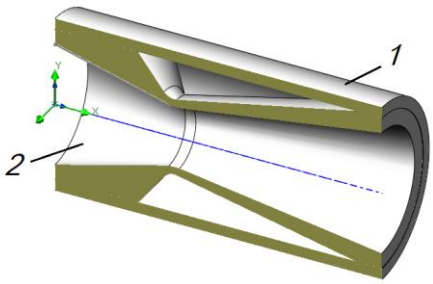


Рис. 15. Принципова схема регульованого сопла Лаваля
1 – сопло; 2 – корпус

Принцип роботи запропонованого сопла полягає у наступному. Газовий потік рухається із попередньо визначеною сталою витратою, що забезпечує його ефективне охолодження при певних значеннях числа Маха. При збільшенні витрати газу зростає його швидкість, що, у свою чергу, змінює швидкість потоку та число Маха.

Для вирівнювання швидкості потоку при можливих коливаннях витрати запропоновано конструкцію сопла, виконану з гіперпружного матеріалу (наприклад, силікону чи гуми). Внутрішня форма та геометричні розміри сопла визначаються необхідними характеристиками газового потоку, тоді як зовнішня форма і розміри можуть змінюватися залежно від бажаної величини деформації внутрішнього отвору в критичному перерізі. Для цього регулюється жорсткість конструкції в окремих зонах сопла.

Відомо, що під час проходження газового потоку через сопло тиск на його внутрішній поверхні розподіляється нерівномірно. Тому при виборі та подальшій оптимізації форми і розмірів сопла за допомогою імітаційного моделювання необхідно враховувати цей нерівномірний розподіл тиску.

Імітаційне моделювання сопла Лаваля було проведене для наочного відображення динаміки зміни газодинамічних параметрів потоку з урахуванням його складу. У моделі використовувалися внутрішні розміри та форма сопла, визначені у попередніх дослідженнях. Моделювання базувалося на наступних граничних умовах:

Газовий потік: Димовий газ цементного виробництва, що має такий склад (за об'ємом): Азот 28%; Повітря 30%; Вуглекислий газ 22%; Вода 11%; Кисень 9% [1].

Тиск на вході: 0,2МПа.

Тиск на виході: Тиск навколишнього середовища.

Температура на вході: 120 °С.

Температура на виході: 20 °С

Результати імітаційного моделювання представлені на рисунку 16.

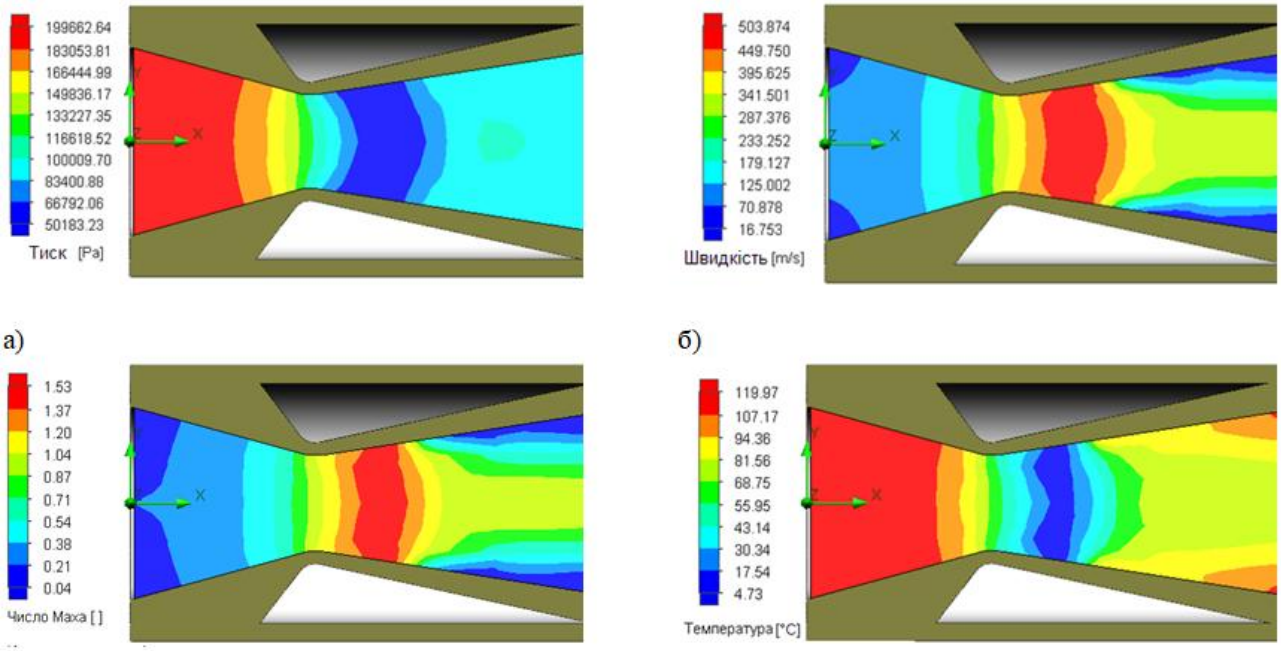


Рис. 16. Характеристики газового потоку вздовж поздовжнього перерізу сопла, отримані за допомогою імітаційного моделювання
а) – розподіл тиску; б) – розподіл швидкості;
в) – число Маха; г) – розподіл температури газового потоку;

Згідно з рисунком 15, у поздовжньому перерізі сопла чітко простежуються очікувані газодинамічні зміни: тиск зменшується, а швидкість руху газу зростає. Як наслідок, у найвужчому перерізі досягається максимальне число Маха, що супроводжується значним зниженням температури газового потоку — від 120°С на вході до 75°С на виході. Для більш детального аналізу, далі розглянуто розподіл тиску по внутрішніх поверхнях сопла зображений на рисунку 17.

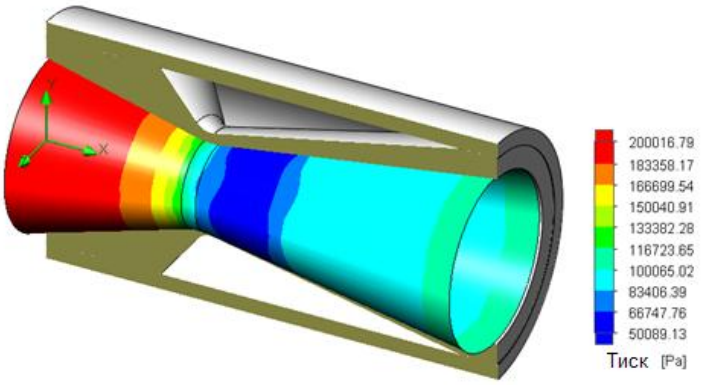


Рис. 17. Результат імітаційного моделювання (розподіл тиску по внутрішніх поверхнях сопла)

Результат імітаційного моделювання з відображенням зміни тиску у вигляді графіка зображено на рисунку 18.

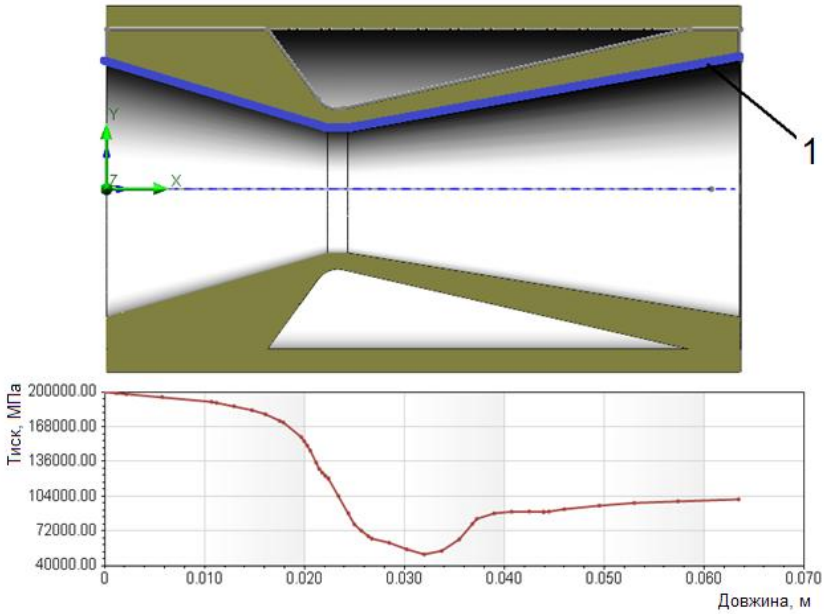


Рис. 18. Зміна тиску за лінією на внутрішній поверхні сопла
1 – лінія, за якою будується графічна залежність

Існує два методи для експорту даних про зміну тиску на внутрішній поверхні сопла до модуля Simulation у програмі SolidWorks:

- функціонал програми забезпечує можливість автоматичного переносу обчислених даних із Flow Simulation [8], щоб вони використовувалися як вхідні навантаження в модулі Simulation;
- дані про тиск можна імпортувати за допомогою рівняння.

Щодо другого способу, його реалізація в SolidWorks вимагає спочатку створити системи координат (рис. 19). Оскільки сопло складається з трьох окремих секцій, необхідно розмістити три окремі системи координат – по одній на початку кожної ділянки.

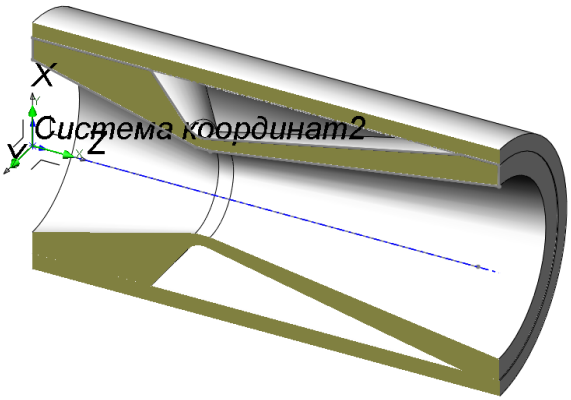


Рис. 19. Система координат

При застосуванні навантаження (тиску) необхідно послідовно обрати внутрішні поверхні сопла та створені системи координат. Оскільки сопло є осесиметричним, доцільно використати циліндричну систему координат. Далі задається рівняння, що описує розподіл тиску на внутрішній поверхні. Це рівняння найзручніше отримати шляхом імпорту графічних даних залежності тиску з Flow Simulation в Excel (рис. 20)

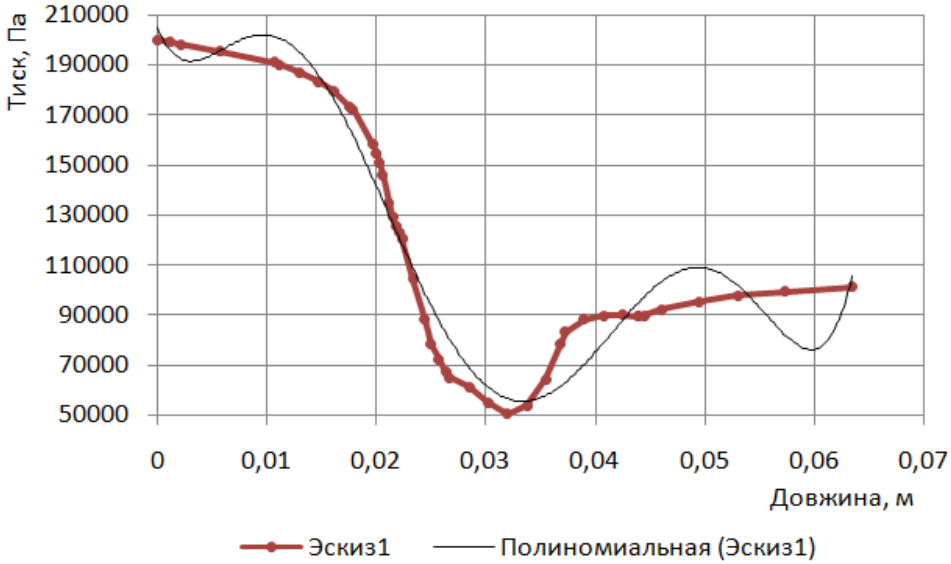
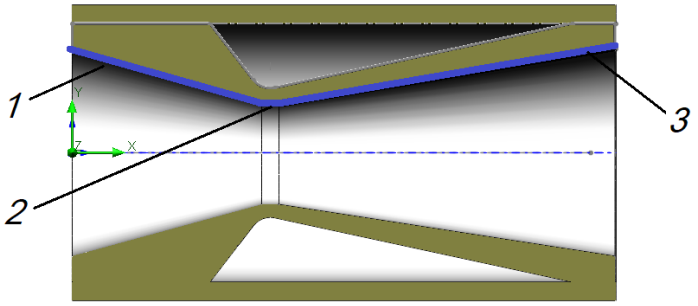


Рис. 20. Розподіл тиску на внутрішній поверхні сопла

Рівняння (1) описує зміну тиску (y) на внутрішній поверхні сопла як функцію координати (x):

$$y = 6{\cdot}1014x6 - 1{\cdot}1014x5 + 8{\cdot}1012x4 - 2{\cdot}1011x3 + 3{\cdot}109x2 - 1{\cdot}107x + 204520, \quad (1)$$

Щоб значно підвищити достовірність апроксимації розподілу тиску, рекомендується розділити внутрішню поверхню сопла на три окремі ділянки (рис. 21) і вивести унікальне рівняння для кожної з них.



1 –зона один; 2 – зона два; 3 – зона три
Рисунок 21 – Зони поверхонь сопла

Рисунки 22–24 демонструють графічні залежності зміни тиску на кожній із окремих ділянок сопла.

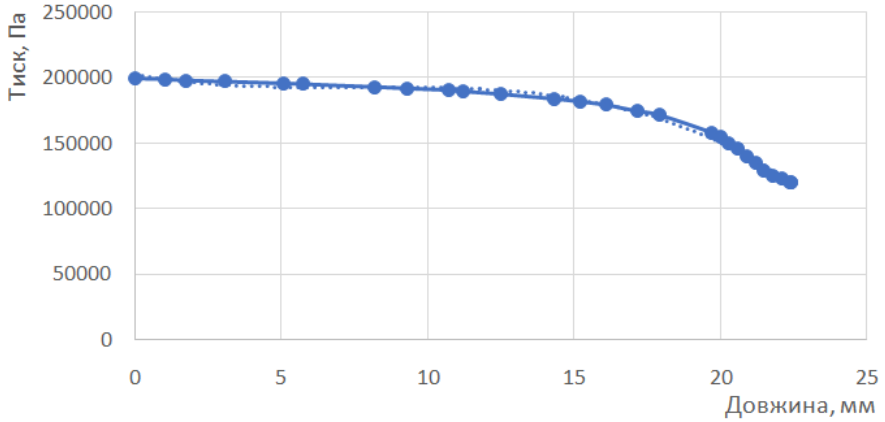


Рис. 22. Розподіл тиску на внутрішній поверхні сопла, зона 1

Зміна тиску на внутрішній поверхні сопла на зоні 1 описується рівнянням 2 і має вигляд:

$$y = -23{,}101x3 + 531x2 - 4010{,}5x + 203009, \quad (2)$$

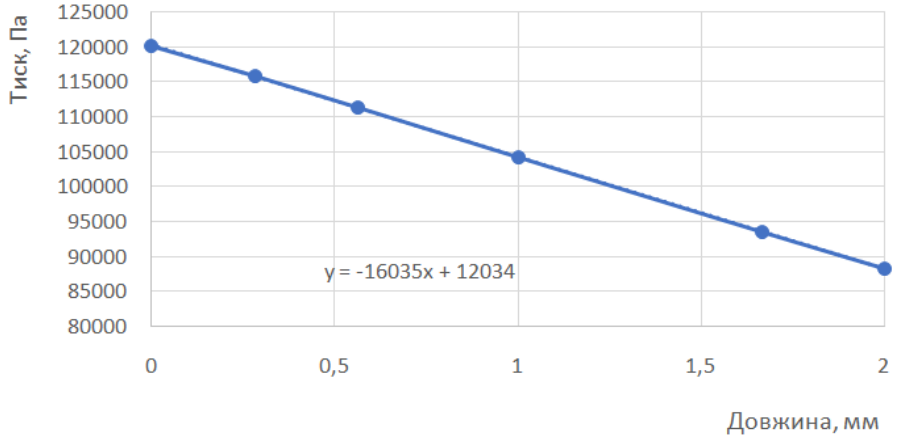


Рис. 23. Розподіл тиску на внутрішній поверхні сопла на зоні 2

Для зони 2 рівняння розподілу тиску на внутрішній поверхні сопла:

$$y = -16035x + 120346 \quad (3)$$

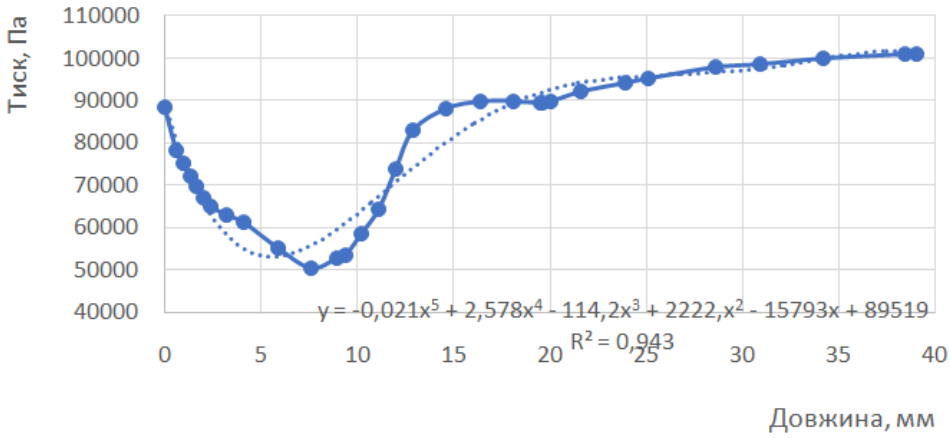


Рис. 24. Розподіл тиску на внутрішній поверхні сопла у зоні 3

Розподіл тиску на внутрішній поверхні сопла у зоні 3 має вигляд рівняння:

$$y = -0{,}0215x5 + 2{,}5784x4 - 114{,}27x3 + 2222{,}9x2 - 15793x + 89519, \quad (4)$$

Розрахункова схема сопла (рисунок 25) демонструє прикладання тиску до внутрішніх поверхонь відповідно до рівнянь (2-4). Важливо відзначити, що програма Simulation візуалізує цю зміну тиску безпосередньо на схемі, зокрема, різною довжиною стрілок, що наочно ілюструє зниження тиску вздовж внутрішньої поверхні (наприклад, на ділянці 1).

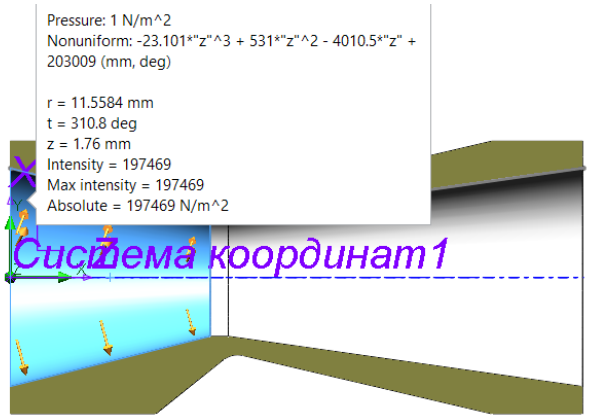


Рис. 25. Схема розрахункової моделі сопла

Розрахункова схема передбачала закріплення сопла шляхом фіксації двох його зовнішніх циліндричних поверхонь. Матеріалом сопла для імітаційного моделювання було обрано силікон SKR-788. Для аналізу використовувалося нелінійне дослідження, яке враховувало покрокове прикладання навантаження і моделювало поведінку силікону за допомогою моделі Муні-Рівліна (Mooney-Rivlin). Результати цього дослідження представлені на рисунках 26 і 27.

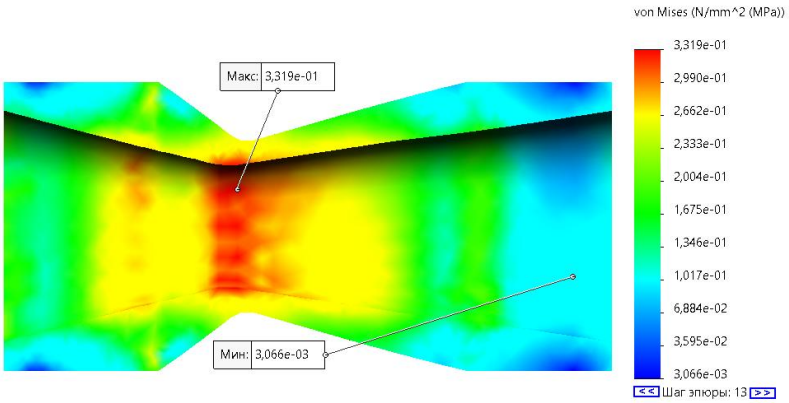


Рис. 26. Візуалізація розподілу еквівалентних напружень (за Мізесом) у поздовжньому перерізі сопла

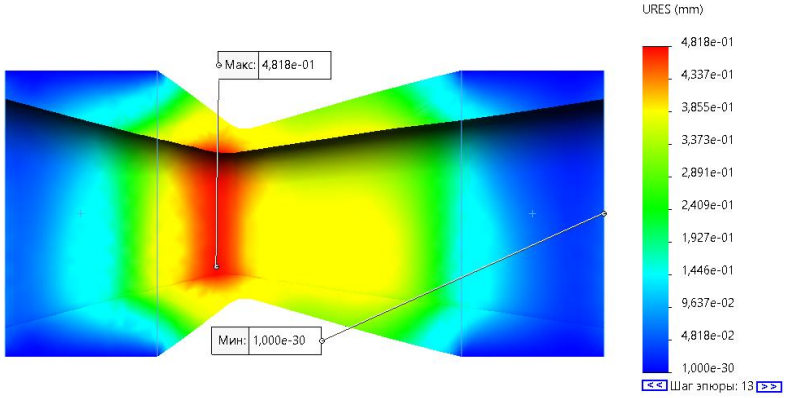


Рис. 27. Розподіл деформацій (переміщень) сопла у поздовжньому перерізі

Згідно з результатами аналізу (рисунки 25 та 26), прикладання тиску до внутрішніх поверхонь сопла (за заданими рівняннями) спричиняє максимальні еквівалентні напруження у ділянці 2, що сягають 0,33МПа. Це призводить до найбільших радіальних переміщень величиною 0,48мм, внаслідок чого діаметр найменшого поперечного перерізу сопла збільшується на 0,96мм. Ця деформація, у свою чергу, змінить швидкість руху газу при повторному моделюванні в Flow Simulation, що вплине на газо- та термодинамічні параметри всього потоку.

Виходячи з цього, ключовою ідеєю є створення авторегульованого сопла, яке дозволяє підбирати оптимальні геометричні параметри для досягнення найкращого охолодження газового потоку при мінімальних енерговитратах.

При проектуванні такого сопла необхідно попередньо враховувати його деформацію при розрахунковій витраті газу:

- при зниженні витрати: внутрішній діаметр повинен зменшуватись, щоб підтримувати необхідне число Маха для охолодження.

- при збільшенні витрати: діаметр повинен збільшуватись, забезпечуючи його працездатність.

Джерела.

1. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. цементна промисловість / С. В. Плашихін. – К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. – 96 с.
2. Патент на корисну модель № 152837, Україна, B03C 3/02. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку / Крижанівський Є. І. (UA); Лях М. М. (UA); Михайлюк В. В. (UA); Маковійчук М.В. (UA); Кучірка Ю. М. (UA); Витриховський Є. А. (UA) – u202200306; Заявл. 25.01.2022; Опубл. 19.04.2023, Бюл. № 16. – 4 с.
3. SKR-788 – Твердий силікон для форм. URL: https://silikoni.com.ua/ru/skr-788-silikon-dlya-form (дата звернення: 15.11.2023).
4. Release Wax – воскова розділова паста (40 грам). URL: https://silikoni.com.ua/release-wax-voskova-rozdilova-pasta-40-hram (дата звернення: 15.11.2023).
5. Абрамович Г.И. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: учеб. Руководство для втузов. М.: Наука. Гл.ред. физ-маг.лит, 1991. 600 с.
6. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. Пермь ОАО «Авиадвигатель», 2006
7. https://patents.su/3-1255765-reguliruemyjj-ehzhektor.html
8. 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).