

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка
Факультет прикладної математики та інформатики
Кафедра обчислювальної математики

З В І Т

з проєкту на тему
Моделювання акустичного глушника

Студентка групи ПМП-41:
Горбачук Богдана Андріївна
Спеціальність 113 — прикладна математика

Викладачі:
доц. Кухарський В.М.
доц. Ящук Ю.О.
ас. Телюк М. Б.

Львів — 2025

Зміст

Вступ	3
1 Постановка задачі	4
1.1 Постановка задачі	4
1.2 Основне акустичне рівняння	4
1.3 Початкові та граничні умови	6
2 Опис моделі	9
3 Результати експериментів	12
Висновки	15

Вступ

Акустичні глушники відіграють важливу роль у зниженні рівня шуму, що створюється різними технічними системами. Зменшення звукового тиску є актуальним як для збереження акустичного комфорту, так і для забезпечення безпеки та відповідності нормативним вимогам. Для ефективного проєктування глушника необхідно враховувати характеристики джерела шуму, геометричні особливості пристрою, властивості середовища та принципи поширення звукових хвиль.

У цій роботі розглядається процес створення та аналізу акустичного глушника власної конструкції за допомогою середовища COMSOL Multiphysics. Метою є зменшення рівня звукового тиску від джерела шуму до допустимого значення шляхом оптимального підбору форми, розмірів і умов моделі. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність запропонованої конструкції та обґрунтувати її практичне застосування.

1 Постановка задачі

1.1 Постановка задачі

На вибір:

- Сформувати акустичний глушник власної конструкції для вихлопу автомобіля. На вхід подається 130 дБ. Потрібно досягнути на виході глушника менше 100 дБ. Чим менше дБ на виході - тим краще.

- Сформувати акустичний глушник для зброї. Обрати калібр із брошури та спробувати досягнути значення, ближчого до 100 дБ.

У двох варіантах потрібно мати на увазі "адекватність" моделі - типові розміри для виробів, матеріал середовища тощо.

1.2 Основне акустичне рівняння

У середовищі COMSOL це рівняння описує поширення акустичних хвиль у частотній області з урахуванням джерела сили \mathbf{q}_d та джерела маси Q_m . Загальне рівняння тиску в середовищі з неоднорідною густиною та джерелами має вигляд:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (1)$$

Де:

- p_t — загальний акустичний тиск.
- ρ_c — ефективна (комплексна) густина середовища.
- \mathbf{q}_d — джерело імпульсу (дипольне джерело), що моделює напрямлену дію.
- k_{eq} — ефективне хвильове число.
- Q_m — джерело маси, що описує монопольні джерела тиску.
- ∇ — оператор градієнта або дивергенції залежно від контексту.

Загальний тиск визначається як сума:

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

Де:

- p — акустичний тиск, розв’язувана змінна.
- p_b — фонова частина тиску, якщо задана.

Ефективне хвильове число:

$$k_{\text{eq}}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2 \quad (3)$$

Де:

- ω — кутова частота (в радіанах за секунду).
- c_c — ефективна швидкість звуку.

В моделі приймаємо:

$$c_c = c, \quad \rho_c = \rho \quad (4)$$

тобто ефективні параметри дорівнюють звичайним — це спрощення для однорідного середовища.

Пояснення до рівнянь:

- $\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right)$ — це диференціальний оператор, який визначає векторне поле градієнта тиску та векторний потік звукових джерел (враховує просторову змінність тиску і джерело імпульсу \mathbf{q}_d).
- $\frac{k_{\text{eq}}^2 p_t}{\rho_c}$ — цей член описує вихідні властивості середовища, такі як щільність і швидкість звуку, і характеризує поширення звукових хвиль у середовищі.
- Q_m — джерело маси, яке моделює внутрішнє або зовнішнє джерело звуку (монополь).
- $p_t = p + p_b$ — загальний тиск, який є сумою тиску p (розв’язувана змінна) і фонові компоненти p_b .
- k_{eq} — ефективне хвильове число, яке враховує властивості середовища, в тому числі частоту та швидкість звуку.

- c_c та ρ_c — швидкість звуку та густина середовища відповідно, які можуть залежати від температури, тиску та інших фізичних факторів. У цій моделі приймається $c_c = c$, $\rho_c = \rho$ для спрощення (однорідне середовище).

1.3 Початкові та граничні умови

За допомогою початкової умови задаємо значення тиску в момент часу $t = 0$.

$$p = 0 \quad \text{Pa}$$

А також задаємо граничні умови на границях.

Умова жорсткої стіни означає (нульова умова Неймана), що звукові хвилі не проникають через границю — це повністю відбивальна поверхня (наприклад, тверда металева оболонка глушника).

Гранична умова має вигляд:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = 0 \quad (5)$$

Де:

- \mathbf{n} — одиничний вектор нормалі до поверхні (напрямок, перпендикулярний до поверхні межі області).
- p_t — повний акустичний тиск, включає фоновий тиск p_b (тобто $p_t = p + p_b$).
- ∇p_t — градієнт повного тиску, який описує зміну тиску в просторі.
- \mathbf{q}_d — джерело імпульсу (може моделювати наявність направленої джерела звуку).
- ρ_c — густина середовища поблизу границі (вважається сталою або дорівнює ρ).

Ця умова означає, що нормальна компонента акустичного потоку на границі дорівнює нулю. Тобто, звукова енергія не проходить через поверхню — вона або повністю відбивається, або утворюється стояча хвиля. Це характерно для ідеально жорстких, непроникних поверхонь, які не вібрують і не поглинають звук.

Граничні умови типу Діріхле в акустиці. У контексті акустичних задач граничні умови, які задають значення акустичного тиску на межі, є умовами Діріхле.

М'які звукові обмежувачі (Sound Soft Boundaries). Ці обмежувачі припускають повне поглинання хвилі на межі, тобто нульовий тиск:

$$p = 0 \quad (7)$$

- p — акустичний тиск.

Це означає, що на заданій межі звук повністю поглинається і не відбивається. Такі умови ідеально моделюють акустично м'які поверхні (наприклад, відкриті краї труби або ідеальні поглиначі).

Джерело тиску (Pressure Source). Ця умова задає фіксоване значення тиску p_{in} на межі:

$$p = p_{\text{in}} \quad (8)$$

- p_{in} — визначене (зазвичай стале або гармонічне) значення тиску на межі.

Ця умова означає, що на відповідній межі підтримується задане значення тиску (наприклад, тиск, який генерується звуковим випромінювачем чи джерелом звуку).

Наступна умова - Port. Ця умова застосовується для моделювання входу та виходу акустичних хвиль в моделях, які мають порти (наприклад, вхідні та вихідні канали в глушнику або трубопроводі). Вона описує, як звукові хвилі входять у модель через певні порти з відомими амплітудами та фазами.

$$p_t = \sum_{i \in \text{bnd}} A_i^{\text{in}} e^{i\phi(S_{ij} + \delta_{ij})} p_i, \quad j = \text{номер порту падної хвилі} \quad (6)$$

Де:

- p_t — повний акустичний тиск на межі, пов'язаний з усіма хвилями, які входять через порти.
- A_i^{in} — амплітуда падаючої хвилі на i -му порту (керується користувачем або задається умовами задачі).

- ϕ — фаза падаючої хвилі, зазвичай залежить від частоти і довжини хвилі.
- S_{ij} — елемент матриці розсіювання (S-матриця), який описує, яка частка енергії з j -го порту переходить в i -й порт.
- δ_{ij} — символ Кронекера:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

використовується для задання того, чи йдеться про самий j -й порт, чи інший.

- p_i — власна модальна форма тиску на i -му порту (наприклад, вигляд хвилі на межі порту).
- bnd — множина всіх портів, які включені в розрахунок (границі, де задана ця умова).

Ця умова описує суперпозицію падаючих хвиль на межі моделі, де задані порти. Вона дозволяє задавати:

- напрям хвиль (падаюча чи відбита);
- амплітуду хвилі;
- фазу;
- зв'язки між портами (через S -матрицю).

Це дає змогу моделювати такі явища, як передача і відбиття хвиль, розсіювання в порожнинах, вплив хвиль на резонанс тощо.

2 Опис моделі

Задамо два варіанти глушника для зброї через 3D компоненти.

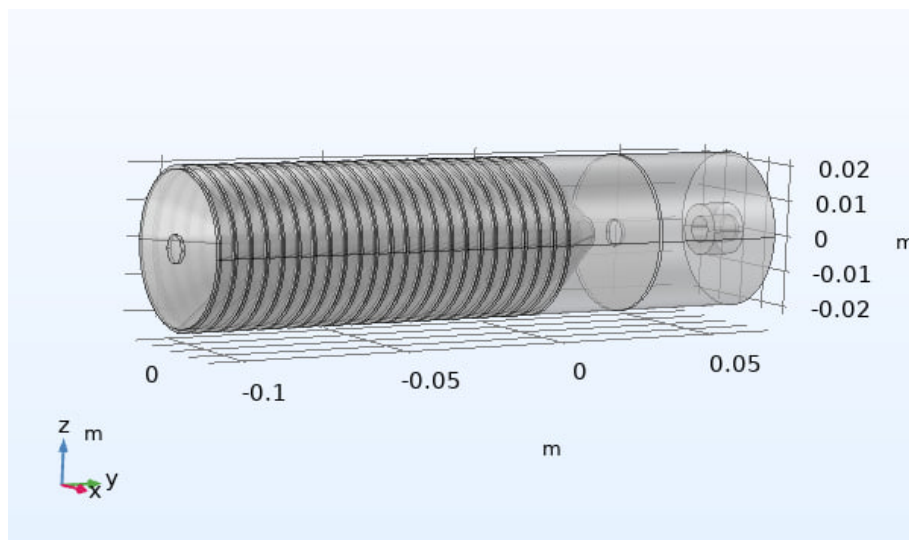


Рис. 1: Перший варіант конструкції

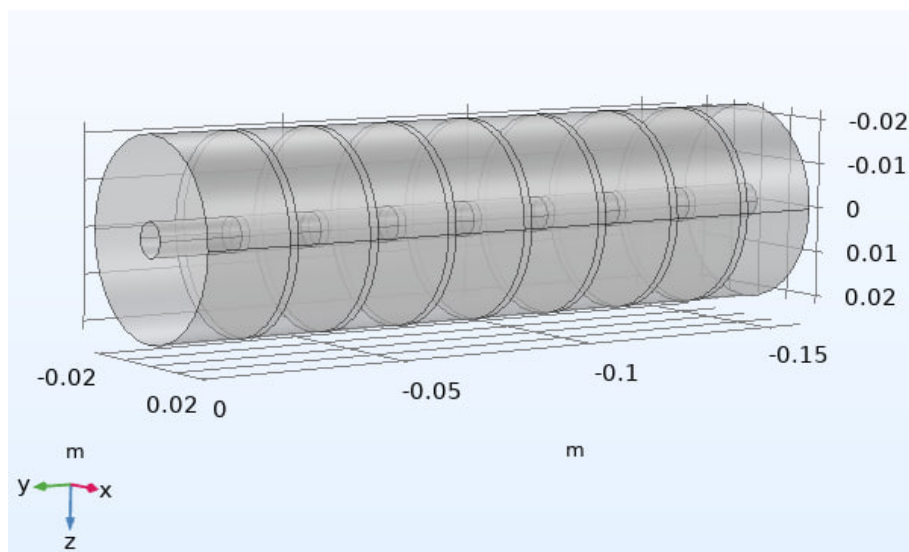


Рис. 2: Другий варіант конструкції

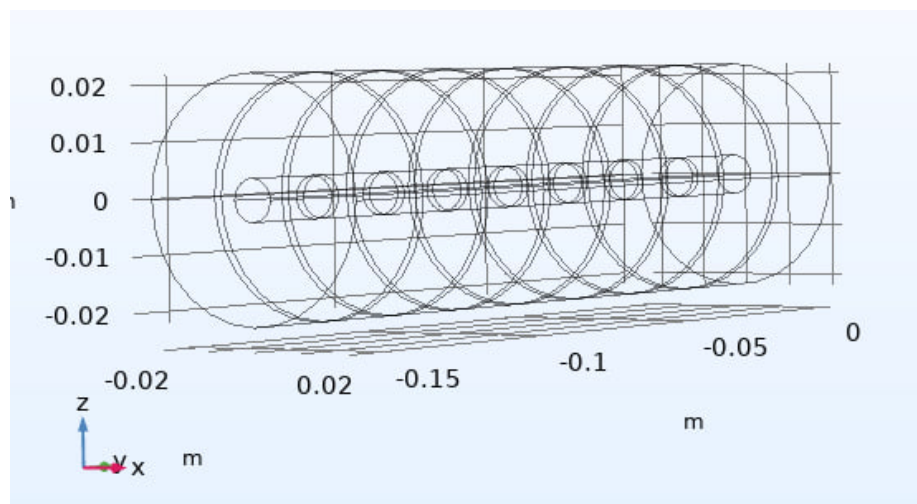


Рис. 3: Другий варіант конструкції з пороакустичною умовою

Задаємо умову Hard Wall:

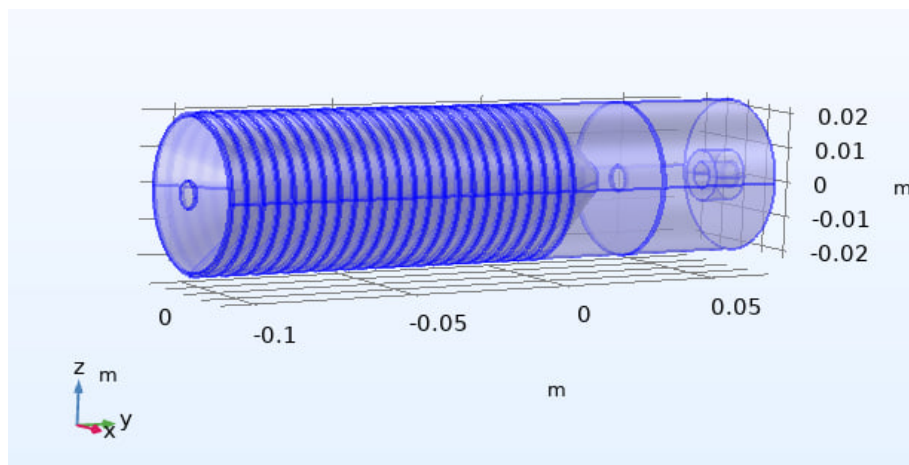


Рис. 4: Задання умови Hard Wall

У другому випадку, для тесту також задамо умову Poroacustics для перевірки різниці:

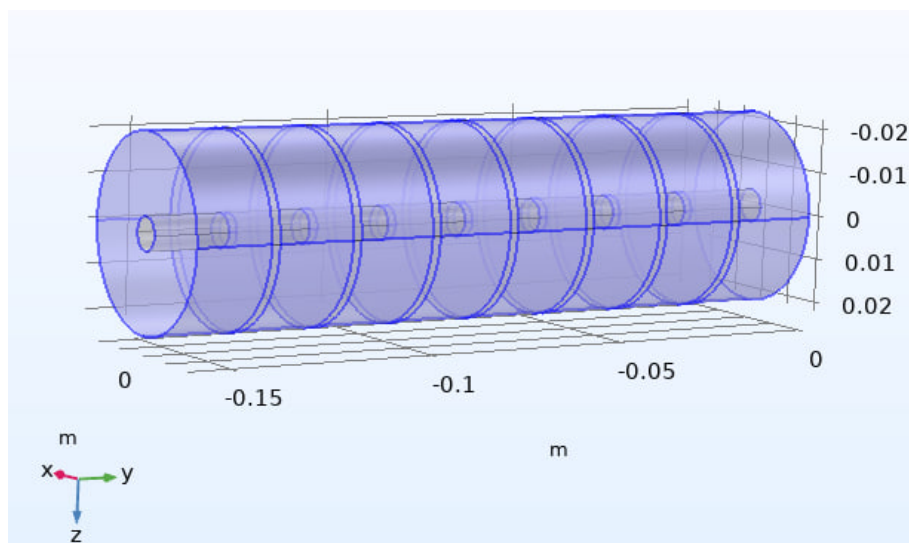


Рис. 5: Задання умови Poroacustics

3 Результати експериментів

Для експерименту використовуємо калібр .308. На вхід подається 156.2 децибел.

Результат для першої конструкції:

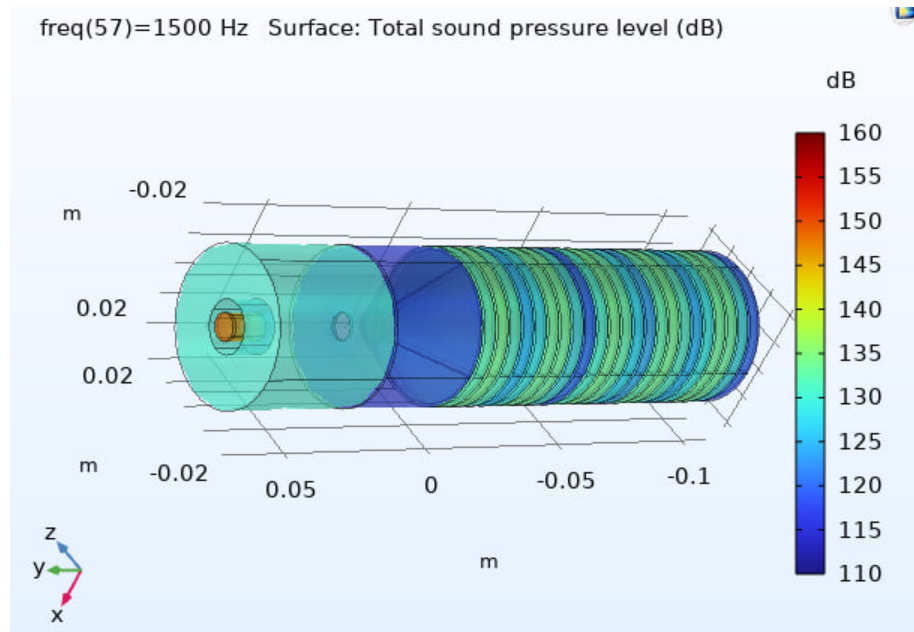


Рис. 6: Результат першого глушника

Результат для другої конструкції:

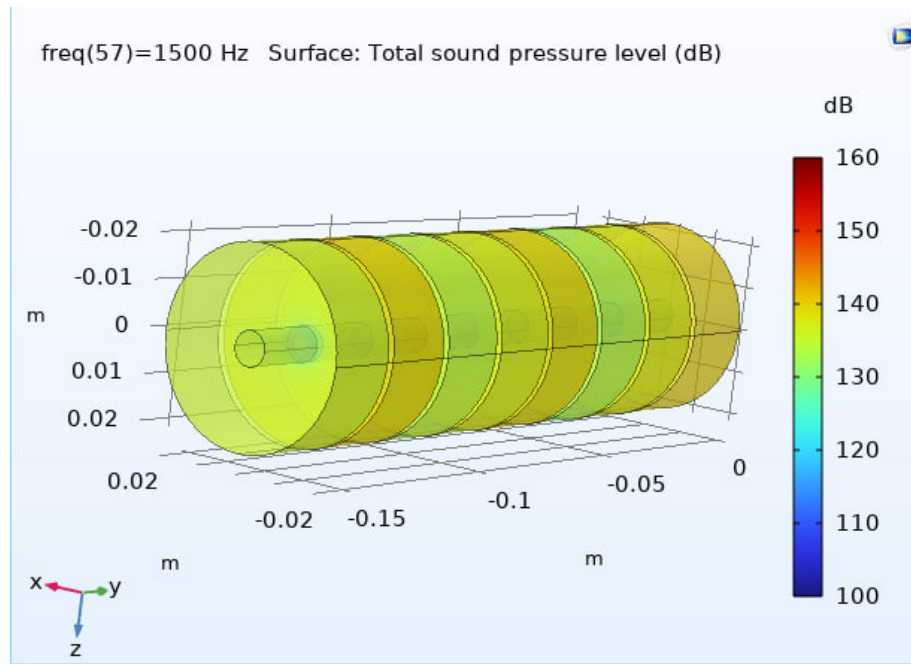


Рис. 7: Результат другого глушника

Результат для другої конструкції з пороакустичною умовою:

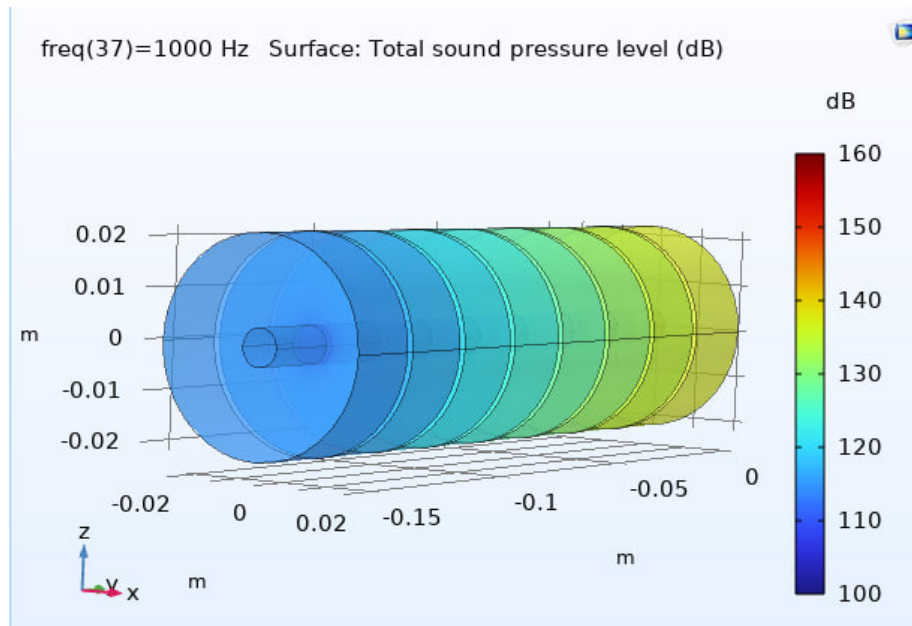


Рис. 8: Результат другого глушника з пороакустичною умовою

Висновки

Проведене чисельне моделювання продемонструвало високу ефективність розроблених геометричних конфігурацій глушників у зниженні рівня звукового тиску до значень, що відповідають сучасним вимогам до стрілецьких шумозаглушувальних систем. У професійному акустичному проектуванні типовим орієнтиром для допустимого рівня звукового тиску вважається поріг у 140 дБ — саме цей рівень визначається як критичний для виникнення незворотних ушкоджень слуху при короткочасному впливі імпульсного шуму.

Результати моделювання свідчать, що запропоновані конструкції здатні ефективно знижувати звуковий тиск до діапазону 120–140 дБ залежно від типу навантаження та геометричних параметрів. У ряді конфігурацій досягнуто значень близько 120 дБ, що є дуже добрим результатом для пасивних шумопоглинальних засобів і підтверджує їх придатність для використання як у професійних, так і в аматорських стрілецьких системах. Таким чином, реалізовані моделі відповідають реалістичним інженерним критеріям і можуть бути використані як база для подальшого удосконалення глушників з урахуванням специфіки експлуатаційних умов.

У той же час, результати аналізу свідчать про те, що зниження рівня звукового тиску нижче 100 дБ винятково за рахунок пасивних засобів шумопоглинання (без використання активних систем або суттєвого збільшення габаритів пристрою) є малоімовірним через фундаментальні фізичні обмеження, пов'язані з особливостями хвильових процесів у газовому середовищі.

Додатковий аналіз граничних умов показав, що застосування пороакустичних умов та умов м'яких (акустично поглинаючих) стін забезпечує значно вищу ефективність у придушенні звукових хвиль порівняно з жорсткими (акустично відбиваючими) межами. Це особливо помітно у високочастотному діапазоні, де ключову роль відіграють в'язко-термічні ефекти у порах матеріалу.

Для практичної реалізації таких систем доцільно використовувати вогнетривкі пористі матеріали, стійкі до дії високих температур та агресивного середовища. До рекомендованих матеріалів належать:

- мінеральна вата з алюмінізованим прошарком;

- базальтові пористі композити;
- керамічні піни на основі карбіду кремнію (SiC);
- перфоровані метали з наповнювачами на основі оксидів алюмінію або кремнію.

Застосування чисельного моделювання в середовищі **COMSOL Multi-physics** дозволило з високою точністю оцінити розподіл звукового тиску всередині глушника з урахуванням його складної внутрішньої структури та неоднорідних граничних умов. Це, у свою чергу, надало змогу оптимізувати параметри конструкції ще на етапі проєктування, істотно зменшивши потребу в трудомістких експериментальних випробуваннях.

Література

1. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*, Trevor Cox and Peter D'Antonio.
2. *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Piergiorgio Alotto and Alessandro Bettucci.
3. *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, COMSOL Inc.
4. *Acoustic Analyses Using Matlab® and Ansys®*, Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato.