

Аналіз акустичних властивостей вентиляційних каналів

Моделювання спадання акустичної енергії в каналі за допомогою COMSOL Multiphysics

Сараненко^f А. М., ORCID [0000-0001-7422-4582](https://orcid.org/0000-0001-7422-4582)

e-mail andrewsaranenko@gmail.com

Богданов^g О. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-0911-5563](https://orcid.org/0000-0002-0911-5563)

e-mail: ov.bogdanov@aae.kpi.ua

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—У сфері вимірювання акустичних параметрів є два спеціалізованих міжнародних стандарти для розрахунку рівнів звукового тиску у лабораторних умовах: точний та інженерний (розрахунковий) методи. Дані стандарти відрізняються підходами до проведення тестування, включаючи забезпечення безлунного середовища для акустичних випробувань та є складовою частиною серій стандартів, що встановлюють методи для визначення рівнів звукового тиску (SPL) для різних типів обладнання й потребують забезпечення умов вільного поля або вільного поля з плоским відбиваючим середовищем. На даний момент існують дві основні стандартизовані вимоги до акустичного середовища: допустима похибка створюваного вільного звукового поля (FFA) й фоновий шум (BN), але сучасне проектування вимагає застосування передових технологій.

Програма COMSOL Multiphysics дозволяє вирішувати широкий спектр завдань у сфері оцінки шумової дії. Метод скінченних елементів, що використовується у програмі виступає у якості світового стандарту для моделювання високоефективних вентиляційних систем у країнах Європи та США.

У даній роботі запроєктована віртуальна модель шумопоглинаючого вентиляційного каналу й задані параметри звукозаглушеної камери з використанням основних положень та методик інженерних розрахунків у середовищі COMSOL Multiphysics і державних стандартів; показані такі переваги COMSOL Multiphysics як: висока точність розрахунків; зменшення трудомісткості обчислень; можливість виявлення критичних зон та розробка протишумових заходів.

Запропонований метод високоточного проектування ефективного шумопоглинаючого вентиляційного каналу дозволить виконувати вимірювання з урахуванням положень міжнародних стандартів та вийти на європейський ринок.

Результати роботи можуть бути використані на підприємствах та у будівельних організаціях при проектуванні шумопоглинаючих вентиляційних каналів за світовими стандартами.

Бібл. 18, рис. 2, табл. 2.

Ключові слова — акустичні вимірювання; стандарти; вентиляційна система; метод скінченних елементів; 3D моделювання.

I. ВСТУП

Першу випробувальну акустичну камеру побудував Уоллес Клемент Себін у 1910 році. В США у 1933 році заснована Асоціація акустичних матеріалів, що у 1934 році випустила щорічний бюлетень звукопоглинальних коефіцієнтів. Найвідоміша сучасна звукозаглушена камера встановлена у США ученими лабораторії Орфілда, де проходять підготовку астронавти.

Серед вчених ближнього зарубіжжя питання випробування малошумних вентиляційних систем у звукозаглушених камерах вивчали Гусев В.П. [1], [2] та Кондрашов Д. [3].

Українські учені: Кононенко А.П., Лисюк М.О., Дідковський В.С. [4], Заєць В.П. [5], Трохименко М., Фаренюк Г. мають результативні напрацювання

у цьому напрямку, які застосовуються для розробки та вдосконалення акустичних вимірювань.

У Південному університеті науки та техніки (Шеньчжень), Інституті електротехніки Китайської академії наук (Пекін), Харбінському технологічному інституті (Харбін) досить широко використовують модуль COMSOL Multiphysics у моделюванні оптичних та акустичних конструкцій.

Дослідники компанії Brüel and Kjær (Данія) використовують моделювання для досягнення нових рівнів точності власних промислових та вимірювальних мікрофонів та перетворювачів. Норвезькі вчені за допомогою додатків COMSOL Multiphysics вивчають низькочастотні звукові хвилі, що розповсюджуються всередині будівель та визначають яким чином вдосконалити конструкцію для зменшення дратування



вібраціями (інститут NGI). Сьогодні можна побачити зростаючу світову технічну необхідність до проведення акустичних випробувань у заглушених камерах. Директива Energy related Products (ErP) блокує поширення на території ЄС пристроїв, у тому числі вентиляційних систем, що не відповідають стандартам та встановленим параметрам. Прилади та конструкції, що відповідають усім вимогам, маю можливість вийти на європейський ринок [6], [7], [8].

Провідним розробникам і виробникам, за допомогою новітніх технічних рішень, вдалося досягти не тільки зниження вартості розробки, виготовлення та складання акустичних камер, а і простоти обслуговування та збільшення терміну служби матеріалів порівняно з попередніми камерами. У першу чергу, приділяється особлива увага тим поглиначам, які використовуються для створення вільного звукового поля, а також модернізації вже наявних об'єктів для мінімізації капіталовкладень.

Основою для проектування шумоглушника систем вентиляції є акустичний розрахунок – обов'язковий додаток до проекту вентиляції будь-якого об'єкта. Основні завдання такого розрахунку: визначення октавного спектра повітряного, структурного вентиляційного шуму в розрахункових точках і його подальшого зниження шляхом зіставлення цього спектра з допустимим спектром по гігієнічним нормам. Після підбору будівельно-акустичних заходів щодо забезпечення необхідного зниження шуму проводиться перевірочний розрахунок очікуваних рівнів звукового тиску, в тих же розрахункових точках, з урахуванням ефективності цих заходів. Від точності виконаного акустичного розрахунку залежить ефективність шумозаглушення та вартість його здійснення. Якщо величина розрахованого необхідного зниження шуму занижена, то заходи будуть недостатньо ефективні. У цьому випадку потрібно усунення недоліків на діючому об'єкті, що неминуче пов'язано з істотними матеріальними витратами. При підвищеному необхідному зниженні шуму невиправдані витрати закладаються безпосередньо у проект [9], [10].

Сучасність вимагає застосування інформаційних технологій у моделюванні вентиляційних каналів. Однією з таких є 3d візуалізація результатів акустичних розрахунків. Програма COMSOL Multiphysics дозволяє вирішувати широкий спектр завдань у сфері оцінки шумової дії і допомагає зменшити трудоміст-

кість обчислення, виявити критичні зони та розробити протишумові заходи. Метод скінченних елементів, що лежить в основі програмних розрахунків, [11], [12] для країн Європи та США виступає у якості світового стандарту моделювання високоефективних вентиляційних систем.

Метою даної роботи є аналіз ефективності розрахунків октавного спектра вентиляційного шуму у розрахункових точках за методиками міжнародних і державних стандартів та COMSOL Multiphysics.

II. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

A. Міжнародні стандарти

У сфері вимірювання акустичних параметрів є два спеціалізовані міжнародні стандарти для розрахунку рівнів звукового тиску в лабораторних умовах: ISO 3744¹ (ДСТУ EN ISO 3744:2016²) описує інженерний (розрахунковий) метод та ISO 3745³, що пропонує точний метод (ДСТУ EN ISO 3745:2014⁴).

Дані стандарти відрізняються підходами до проведення тестування, включаючи забезпечення заглушеного середовища для акустичних випробувань. Стандарти ISO 3744 та ISO 3745 — це частина серій стандартів ISO 3740⁵, які встановлюють методи визначення рівнів звукового тиску (Sound Pressure Level, (SPL)) для різних типів обладнання та вимагають забезпечення умов вільного поля або вільного поля з плоским відбиваючим середовищем. У даний час існують дві основні вимоги до акустичного середовища, що повинні відповідати ISO: допустима похибка створюваного вільного звукового поля (Free Field Adequacy, (FFA)) і фоновий шум (Background Noise). Якщо вимоги до фонового шуму у камері залежать від рівня шуму джерела звуку, який тестується, то основний критерій для FFA не залежить від джерела звуку, який випробовується всередині заглушеного приміщення. Звуковий тиск знижується при збільшенні відстані від джерела звуку [13], [14]. Вимірний параметр порівнюється з теоретичним падінням рівня від точки джерела у вільному звуковому полі і різниця повинна бути менше, ніж значення, наведені у табл. 1. Якщо значення перевищує максимальне, то необхідно використовувати стандарт ISO 3744. Якщо $\delta < 0,5$ дБ в кожній смузі частот, то камера атестується за стандартом ISO 3745. Якщо різниця лежить в значеннях від 6 до 10 дБ, слід застосовувати коефіцієнт корекції K_1 відповідно до стандарту ISO 3744.

ТАБЛИЦЯ 1 Порівняння стандартних відхилень заглушеної камери у відповідності до ISO 3744 та ISO 3745

¹ ISO 3744:2010 Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane.

² ДСТУ EN ISO 3744:2016 Акустика. Визначення рівнів звукової потужності та рівнів звукової енергії джерел шуму за звуковим тиском. Технічні методи для практично вільного поля над звуковідбивальною площиною. IDT

³ ISO 3745: 2012 Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms.

⁴ ДСТУ EN ISO 3745:2014 Акустика. Визначення рівнів звукової потужності та рівнів звукової енергії джерел шуму за звуковим тиском. Точні методи для заглушених і напівзаклушених камер. IDT

⁵ ISO 3740:2000 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Guidelines for the use of basic standards.



1/3 смуга октави центральної частоти (Гц)	Припустиме відхилення, δ (дБ)	
	ISO 3744	ISO 3745
50-80	5,0	2,0
100-630	3,0	1,0
800 – 5000	2,0	0,5
6300-10000	1,5	1
12500-20000	2,5	2,0
Середньозважене значення рівня звукового тиску	1,5	0,5

У результаті порівняльного аналізу визначено, що стандарт ISO 3745 гарантує найвищий рівень точності вимірювання, але вимагає досвіду побудови звукопоглинальних камер. ISO 3744 також пропонує високі показники точності, але у вимірах окремих типів приладів, де висока точність занадто кошторисна та надлишкова.

В. Розрахунки відповідно до державних стандартів

Для проведення акустичного розрахунку ми керувалися вимогами державних стандартів⁶.

Октавні рівні звукового тиску L , дБ шуму, який пройшов по каналу або повітропроводу, визначається у розрахункових точках приміщень та територій за величинами рівнів звукової потужності $L_{w_{np}}$, дБ шуму, що пройшов по каналу від джерела, на виході в об'єкт шумозахисту з розрахунковою точкою. Рівні звукової потужності $L_{w_{np}}$ при проходженні шуму по каналу, який виходить в приміщення або на прилеглу територію, що захищається від шуму, визначали за формулою:

$$L_{w_{np}} = L_{w_{вх}} - \Delta L_{w_{сум}} \quad (1)$$

де $\Delta L_{w_{сум}}$ – сумарні втрати октавних рівнів звукової потужності шуму на шляху його поширення від джерела по каналу або повітропроводу (на прямих ділянках, поворотах, внаслідок відбиття звуку від відкритого кінця повітропроводу тощо), від входу в канал до виходу в об'єкт шумозахисту з розрахунковою точкою; $L_{w_{вх}}$ – октавний рівень звукової потужності, що випромінюється джерелом шуму безпосередньо в канал; приймається за даними технічної документації на джерело шуму, а при їх відсутності за даними акустичних вимірювань. Сумарні втрати рівнів звукової потужності $L_{w_{np}}$ на шляху поширення шуму по повітропроводу або каналу визначалися в октавних смугах частот за формулою (2):

$$\Delta L_{w_{сум}} = \sum_{i=1}^n \Delta L_{w_i} \quad (2)$$

де L_{w_i} – втрати рівнів звукової потужності в окремих елементах повітропроводу (поворот, розгалуження, зміна поперечного перерізу, відбиття звуку від відкритого кінця каналу тощо), n – загальна кількість елементів повітропроводу, в яких виникають втрати рівня звукової потужності.

Втрати рівнів звукової потужності на 1 м довжини на прямих ділянках металевих повітропроводів прямокутного і круглого перерізів приймалися у залежності від величини діаметра повітропроводу D_r та визначалися за формулою:

$$D_r = \frac{4F}{\Pi}, \quad (3)$$

де F – площа поперечного перерізу повітропроводу; Π – периметр повітропроводу.

С. Комп'ютерне моделювання

Для виконання акустичних розрахунків та моделювання процесу згасання акустичної енергії використовувався метод скінченних елементів (МСЕ), що у даний час, виступає в якості світового стандарту. Найбільш відомим спеціалізованим програмним комплексом, що здатний реалізувати МСЕ є COMSOL Multiphysics 5.2 ("COMSOL Group", Швеція) [15], [16].

МСЕ широко використовують у проектуванні вентиляційних систем стадіонів (Пхеньян, Калькутта, Куала-Лумпур), льодових палаців (Дубаї, Санкт-Моріц, Кіндердайк), адміністративних будівель на державне та комерційне замовлення. Науковцями визнано [17], що при моделюванні за стандартними методиками результати суттєво відрізняються від значень за МСЕ.

Для створення моделі вентиляційного каналу використовувалася Solidworks 2016x64 Edition. Отримана 3d модель конвертована у формат Parasolid. У файлі, створеному у COMSOL Multiphysics обрано: Model Wizard, розмірність простору 3d, розділ фізики Pressure Acoustic, Frequency

Domain і проведено налаштування початкових параметрів. У розділі Geometry імпортовано модель вентиляційної системи у форматі Parasolid, та задані потрібні матеріали у розділі Materials для кожного шару системи. У розділі фізики зазначено, що межа між повітрям та звукопоглинальним матеріалом є Impedance, а між останнім та каркасом – Sound Hard Boundary. Вхід вентиляційної системи (там, де встановлюється вентилятор) задано пунктом Plane Wave Radiations, вихід також вказано Impedance. У розділі Solid Mechanics визначено еластичність звукопоглинаючого матеріалу, Liner Elastic Material.

⁶ ДСТУ-Н Б В.3.1-XX:201X Експлуатація конструкцій та інженерного обладнання споруд, зовнішніх мереж. Обстеження технічного стану будівель та споруд. Проект, остаточна редакція.

⁷ ДСТУ-Н Б В.1.1-35: 2013 Настанова з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях.



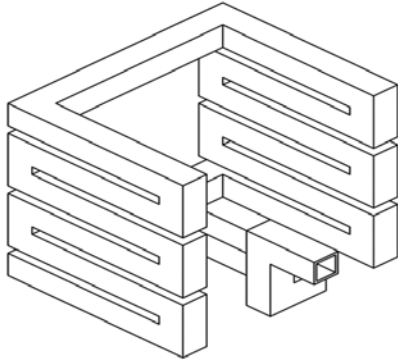


Рис. 1 Запроектований шумопоглинаючий вентиляційний канал

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для проведення аналізу запроектовано повітропровід довжиною 35,4 м, який складається з квадратного каркасу із сторонами 300 мм. Матеріал каркасу — оцинкована сталь товщиною 0,5 мм, всередині якого звукопоглинальний матеріал K-FONIK ST GK товщиною 30 мм (10% від ширини каркасу) та металева сітка товщиною 0,5 мм, загальна площа отворів 98% (рис. 1).

На вхід вентиляційної системи подавався тиск в 2 Па, тобто рівень звукового тиску складав:

$$L_{W_{\text{вх}}} = 100 \text{ дБ}.$$

Далі наведені розрахунки та результати моделювання для частоти 500 Гц. Проте отримані результати і для частот 63, 125, 250, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

A. Результати розрахунку відповідно до державних стандартів

Гідравлічний діаметр повітропроводу був заданий відповідно до формули:

$$D_r = \frac{4 \cdot 300 \cdot 300}{4 \cdot 300} = 300 \text{ (мм)}. \quad (4)$$

Втрати рівнів звукової потужності на прямих ділянках повітропроводів, на частоті 500 Гц, склали 0,3 дБ/м, тоді за формулою (1) було отримано: $\Delta L_{w_1} = 0,3 \cdot 35,4 = 10,62$ (дБ).

Втрати рівнів звукової потужності у прямокутних поворотах повітропроводу шириною $D = 238 \approx 250$ склали 6,0 дБ, отже, за рахунок тридцяти поворотів, рівень шуму зменшується на:

$$\Delta L_{w_2} = 6 \cdot 30 = 180,0 \text{ (дБ)}.$$

Втрати рівнів звукової потужності у результаті відбиття звуку, при потраплянні його у приміщення

або в атмосферу від відкритого кінця повітропроводу, визначали як табличне значення. Корінь квадратний із площі поперечного перерізу кінця моделі повітропроводу складає 300 мм, тоді втрати рівнів звукової потужності відповідають значенню:

$$\Delta L_{w_3} = 1,0 \text{ (дБ)}.$$

Сумарні втрати октавних рівнів звукової потужності шуму на шляху його поширення склали

$$\Delta L_{w_{\text{сум}}} = 10,62 + 180,0 + 1,0 = 191,62.$$

Іншими словами при проходженні повітря по вентиляційним каналам рівень шуму зменшиться на 191,62 дБ.

B. Результати комп'ютерного моделювання

У даній роботі визначений рівень звукової енергії у COMSOL Multiphysics 5.2. На рис. 2 наведено результати моделювання для частоти 500 Гц, при подачі акустичного шуму з тиском в 2 Па.

При розрахунку в COMSOL не враховані втрати рівнів звукової потужності у результаті відбиття звуку від відкритого кінця повітропроводу, коли він вільно виступає в приміщення, тому що для цього було б потрібно моделювати й приміщення, що потребує надзвичайно великих ресурсів комп'ютера. Відповідно були окремо розраховані показники зменшення рівня шуму без урахування цього параметру для більш точного порівняння результатів. Результати розрахунків та комп'ютерного моделювання наведені у табл. 2.

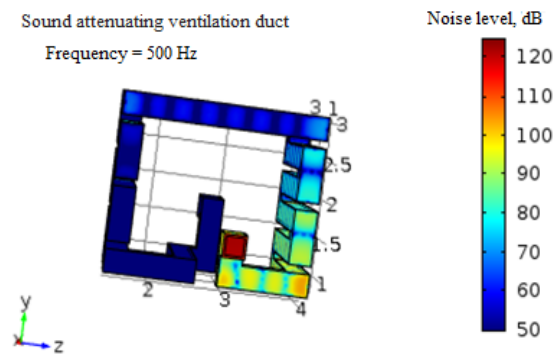


Рис. 2 Зміна рівня звукового тиску на частоті 500 Гц

Таблиця 2 Порівняння зменшення рівнів звукової потужності на виході даної вентиляційної системи

Методика визначення рівня звукової потужності дБ	Частота, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ДСТУ-Н Б В.1.1-35	35,24	29,40	48,93	191,62	370,62	427,08	487,08	540,08
ДСТУ-Н Б В.1.1-35 без відбиття звуку від відкритого кінця повітропроводу	21,24	21,40	45,93	191,62	370,62	427,08	487,08	540,08
COMSOL Multiphysics 5.2	5,00	5,00	11,18	70,0	145,00	60,00	37,00	65,00

С. Обговорення

Від точності акустичного розрахунку залежить ефективність шумоглушення і вартість його здійснення. Якщо величина розрахованого необхідного зниження шуму занижена, то заходи будуть недостатньо ефективні. У цьому випадку буде потрібно усунення недоліків на діючому об'єкті, що неминуче пов'язано з істотними матеріальними витратами. При підвищеному необхідному зниженні шуму невиправдані витрати закладаються безпосередньо в проєкт [15], [16].

При порівнянні значень зниження рівнів, отриманих при розрахунку вентиляційної системи двома способами можна зробити висновок, що найбільше зменшення рівня шуму відбувається у діапазоні 500-1000 Гц та на частоті 8000 Гц.

Дані отримані при розрахунку першим способом відрізняються що найменше у 2.5 рази від отриманих другим способом. Слід зауважити, що результати розрахунку значною мірою завищені. Це можна пояснити тим, що у даному способі показник зменшення рівня шуму на прямокутних поворотах завищений у 2-3 рази. На частотах 63-250 Гц система сама по собі неефективна, але за рахунок втрат рівнів звукової потужності у результаті відбиття звуку від відкритого кінця повітропроводу, коли він вільно виступає в приміщення звукоізоляцію можна значно підвищити. Тому, виступ кінця повітропроводу із стінки необхідний для збільшення ефективності даної системи на низьких частотах.

Висновки

Аналіз вітчизняного та міжнародного досвіду випробувань вентиляційних систем у звукозаглушених камерах, показав, що Європейський Союз на багато років випереджає інші країни. У світі запроваджені нові стандарти ISO, а виробники активно вивчають можливості балансу ціни та якості.

У нашій країні та світі існує зацікавленість щодо випробувань вентиляційних систем у звукозаглушених камерах з метою зниження рівня шуму. Сумісність з міжнародними стандартами - це основна мета, яку переслідує більшість організацій в усьому світі, що займаються вимірюванням потужності звуку для різних видів випробувань.

За минулий час змінилися акустичні характеристики, тому проєктування вимагає найсучасніших технологій. Такою є 3d візуалізація результатів акустичних розрахунків. Програма COMSOL Multiphysics 5.2 дозволяє вирішувати широкий спектр завдань у сфері оцінки шумової дії і допомагає зменшити трудомісткість обчислення, виявити критичні зони та розробити протишумові заходи. Результати акустичних розрахунків як усередині приміщень, так і зовні можуть бути представлені у вигляді детальних звітів.

Виконані обчислення рівнів звукового тиску та звукової потужності показали можливість застосування сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм для зручного аналізу акустичних властивостей вентиляційних каналів на етапі їх проєктування. При узагальненні та порівнянні значень зниження рівнів отриманих при розрахунку вентиляційної системи встановлено, що найбільше зменшення рівня шуму відбувається у діапазоні 500-1000 Гц та на частоті 8000 Гц.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. P. Gusev, "Akusticheskiy raschet kak osnova dlya proyektirovaniya maloshumnoy sistemy ventilyatsii (konditsionirovaniya) [Acoustic calculation as a basis for designing a low-noise ventilation (air-conditioning) system]," *AVOK*, no. 6, 2004, URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2577.
- [2] V. P. Gusev and M. Y. Leschko, "Aeroakusticheskiye ispytaniya ventoborudovaniya [Aeroacoustic tests of ventilation equipment]," *AVOK*, no. 2, 2002, URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1464.
- [3] D. Kondrashov, "Zaglushay i vlastvuy: kak perestat' bespokoit'sya i vybrat' pravil'nyuyu bezekhovuuyu akusticheskuyu kameru za 10 minut [Silence and control: how to stop worrying and choose the right anechoic acoustic camera in 10 minutes]," *Vektor Vysok. tekhnolohiy*, no. 3 (24), pp. 38-46, 2016, URL: <https://ostec-3d.ru/group-ostec/pressroom/articles/kachestvo3/zaglushay-i-vlastvuy-kak-perestat-bespokoitsya-i-vybrat-pravilnuyu-bezekhovuuyu-akusticheskuyu-kameru/>.
- [4] V. S. Didkovskiy, V. P. Zaiets, and N. O. Samiilenko, "Otsinka izolyatsiyi povitryanoho shumy v rozshyrenomu diapazoni chastot [Assessment of airborne noise isolation in the extended frequency range]," *Electron. Commun.*, vol. 16, no. 1(60), pp. 164-168, 2011.
- [5] S. A. Luniova, O. V. Bogdanov, and V. P. Zaets, "Metodichni vказivki do rozrahunkovo-grafichnoyi roboti 'Akustichniy proekt primischennya' z kreditnogo modulya 'Prikladna akustika - 1' [Guidance for calculation-graphic work 'Acoustic room design' with credit module 'Applied Acoustics - 1']," National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, p. 48, 2011, URL: http://acoustic.kpi.ua/assets/files/MetodMater/RGR_PA1.pdf.
- [6] R. Geike, "COMSOL Multiphysics in education-chemical reactions, heat and mass transfer," in *COMSOL conference*, 2008, URL: <https://www.comsol.ru/paper/comsol-multiphysics-in-education-ndash-chemical-reactions-heat-and-mass-transfer-5238>.
- [7] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *Finite Element Method*, 5th ed., vol. 1. UK: Butterworth-Heinemann, 2000, ISBN: 978-0750650496.
- [8] O. Zienkiewicz, R. Taylor, P. Nithiarasu, "The finite element method for fluid dynamics," Amsterdam: Elsevier / Butterworth-Heinemann, 2005, 451 p.
- [9] V.B. Veselovskij, A.I. Gubin, "Matematicheskoe modelirovanie lazernogo termicheskogo uprochneniya bez plavleniya poverhnosti [Mathematical modeling of laser thermal hardening without surface melting]," *Metalurgijna teplotehnika: Zbirnik naukovih prac' NMA Ukraini, Dnipropetrovsk, Ukraine: Nova ideologija*, 2008, pp. 47- 54.
- [10] N. Y. Galushkin, N. N. YAzvinskaya, and D. N. Galushkin, *Reshatel' paketa modelirovaniya tekhnicheskikh protsessov Comsol [Solver of the Comsol process modeling package]*. Shakhtol, Ukraine: ISOiP (branch) of DSTU, 2013.
- [11] V. P. Agapov, *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti prostranstvennykh tonkostemykh podkreplemykh konstruksiy [The finite element method in the statics, dynamics and stability of spatial thin-walled reinforced structures]*. Moscow, Russia: ASV, 2000, ISBN: 5-93093-035-X.
- [12] V.I. Bol'shakov, E.A. Jacenko, G. Sossu, *Osnovy metoda konechnykh elementov [Fundamentals of the finite element method]*. Dnepropetrovsk, Ukraine: PGASA, 2000, ISBN: 966-7282-32-5.



- [13] J. H. Ferziger and M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3th ed. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2002, ISBN: 978-3-540-42074-3, DOI: [10.1007/978-3-642-56026-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2).
- [14] H. L. Shevchenko, "Efektyvni rezhymy roboty ta konstruktivni kompaktnykh reheneratoriv promyslovykh pechey [Effective operating modes and design of compact regenerators for industrial furnaces]," National Metallurgical Academy of Ukraine, 2001.
- [15] S. Yankin, *Akusticheskiye raschoty v COMSOL Multiphysics® [Acoustic calculations in COMSOL Multiphysics®]*. 2017, p. 25, URL: <http://www.acoust-conference.iapras.ru/img/COMSOL.pdf>.
- [16] E. S. Fedotov, "Izvlachenye impedansa zvukopogloshchayushchey konstruktivni v sisteme COMSOL MULTIPHYSICS [Removing the impedance of a sound-absorbing structure in the COMSOL MULTIPHYSICS system]," in *XVI Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, vol. 1, pp. 380–383.
- [17] A. G. Dixon and D. DiBiasio, "Integrating COMSOL into a Mathematical Modeling Course for Chemical Engineers," in *COMSOL Conference*, 2008, p. 7.
- [18] F.S. Kudrjavcev, L.F. Lagunov, "Metodicheskie ukazaniya po raschetu i proektirovaniyu akusticheskikh kamer dlja izmerenija shumovykh harakteristik mashin [Methodical instructions for the calculation and design of acoustic chambers for measuring the noise characteristics of machines]," *Vsesoyuz. CNIi ohrany truda, Moscow, USSR: VCNIOT*, 1978, 80 p.

УДК 534.62 + 004.94 + 006.86

Анализ акустических свойств ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ

Моделирование падения акустической энергии в канале
с помощью COMSOL Multiphysics

Сараненко^f А. Н., ORCID [0000-0001-7422-4582](https://orcid.org/0000-0001-7422-4582)

e-mail andrewsaranenko@gmail.com

Богданов^g А. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-0911-5563](https://orcid.org/0000-0002-0911-5563)

e-mail: ov.bogdanov@aae.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—В сфере измерения акустических параметров есть два вида специализированных международных стандарта для расчета уровней звукового давления в лабораторных условиях: точный и инженерный (расчетный) методы. Данные стандарты являются частью серий стандартов ISO 3740, которые устанавливают методы для определения уровней звукового давления (SPL) для различных типов оборудования. Они отличаются подходами к проведению тестирования, включая обеспечение безэховой среды для акустических испытаний и требуют обеспечения условий свободного поля или свободного поля с плоским средоотражателем. На данный момент существуют два основных требования к акустической среде: допустимая погрешность создаваемого свободного звукового поля (FFA) и фоновый шум (BN), но современное проектирование требует применения передовых технологий.

Программа COMSOL Multiphysics позволяет решать широкий спектр задач в сфере оценки шумового воздействия, а метод конечных элементов, который используется в программе, выступает в качестве мирового стандарта для моделирования высокоэффективных вентиляционных систем в странах Европы и США.

В данной работе спроектирована виртуальная модель шумопоглощающего вентиляционного канала и заданы параметры звукозаглушенной камеры. с использованием основных положений и методик инженерных расчетов в среде COMSOL Multiphysics, а также международных и государственных стандартов. Показаны следующие преимущества COMSOL Multiphysics: высокая точность расчетов; уменьшена трудоемкость вычислений; возможность выявлять критические зоны и разрабатывать противозумовые мероприятия.

Предложенный метод высокоточного проектирования эффективного шумопоглощающего вентиляционного канала позволит выполнять измерения с учетом положений международных стандартов и выйти на европейский рынок.

Результаты работы могут быть использованы на предприятиях и в строительных организациях для проектирования шумопоглощающих вентиляционных каналов по мировым стандартам.

Библ. 18, рис. 2., табл. 2.

Ключевые слова – акустические измерения; стандарты; вентиляционная система; метод конечных элементов; 3D моделирование



UDC 534.62 + 004.94 + 006.86

Analyses of Acoustic Properties of Ventilation Ducts

Modeling the drop in acoustic energy in a channel
using COMSOL Multiphysics

A. M. Saranenko^f, ORCID [0000-0001-7422-4582](https://orcid.org/0000-0001-7422-4582)

e-mail andrewsaranenko@gmail.com

O. V. Bogdanov^s, PhD, Assoc. Prof., ORCID [0000-0002-0911-5563](https://orcid.org/0000-0002-0911-5563)

e-mail: ov.bogdanov@aae.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—Today, the interest in conducting acoustic tests in nondescript cells is increasing worldwide. Leading developers and manufacturers with the help of the latest technical solutions achieved a reduction in the cost of developing, manufacturing and assembly of acoustic cameras, increasing the life of materials compared to previous cameras.

In the field of measuring acoustic parameters, there are two types of specialized international standards for calculating sound pressure levels in laboratory conditions: precise method and engineering (calculation) methods.

These standards differ in approaches to testing, including the provision of loopholes for acoustic tests, and are an integral part of a series of standards that establish methods for determining the levels of sound pressure (SPL) for different types of equipment and require the provision of a free field or free field with a flat reflective medium. At the moment, there are two basic standardized requirements for the acoustic environment: the permissible error of the created free field sound (FFA) and background noise (BN), but modern design requires the use of advanced technologies.

One such technology is the 3d visualization of the results of acoustic calculations. The COMSOL Multiphysics program allows you to solve a wide range of noise problems using the finite element method used in the program and acts as a world standard for the design of high-performance ventilation systems in Europe and the United States.

In this paper a virtual model of the noise-absorbing ventilation duct is designed and the parameters of a sound-damaged camera are designed using the main provisions and methods of engineering calculations in the medium of COMSOL Multiphysics, as well as international and state standards. Showing the following benefits of COMSOL Multiphysics: high accuracy of calculations; reduce the complexity of the calculations; the ability to detect critical areas and develop anti-noise measures.

The proposed method of high-precision designing of the effective noise abatement ventilation channel will allow to carry out measurements taking into account the provisions of international standards and enter the European market.

The results of the work can be used at enterprises and in construction organizations to design sound-absorbing ventilation ducts according to world standards.

Ref. 18, fig. 2., tabl. 2.

Keywords — *acoustic measurements; standards; ventilation system; finite element method; 3D simulation.*

