

УДК 621.452.322:534.833.53

doi: 10.32620/akt.2023.4sup1.03

Є. О. РИМАРЕНКО

ДП "АНТОНОВ", Київ, Україна

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛИНАЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ТРДД

**Предметом** дослідження у статті є звукопоглинаюча конструкція, що призначена для зменшення авіаційного шуму в широкому частотному діапазоні. **Ціллю** дослідження є визначення акустичних характеристик звукопоглинаючої конструкції. **Задачі:** розробка теоретичної моделі звукопоглинаючої конструкції, визначення частотного діапазону в якому буде відбуватися поглинання звуку, виготовлення дослідного зразка та експериментальне визначення коефіцієнта звукопоглинання. Для визначення коефіцієнта звукопоглинання розробленої конструкції використовується експериментальна установка, яка визначає акустичні характеристики звукопоглинаючих конструкцій за **методом** стоячої хвилі. В роботі наведено **результати:** розрахунку власних частот запропонованої конструкції, розрахунку залежності між коефіцієнтом передачі амплітуд і частотою збуджуючої сили, вимірювання акустичних характеристик запропонованої звукопоглинаючої конструкції. **Наукова та практична новизна** отриманих результатів полягає в наступному: для вирішення задачі поглинання шуму в широкому частотному діапазоні була розроблена теоретична модель звукопоглинаючої конструкції, що має складатися з трубок різної довжини. Кожна трубка має власну частоту коливання повітря всередині трубки. Зі збільшенням шляху руху звуку всередині трубки зменшується власна частота трубки. При розміщенні на дослідному зразку трубок різної довжини можна отримати конструкцію зі значною кількістю власних частот, тобто шум буде поглинатися в широкому частотному діапазоні. Запропонована конструкція, що складається з семи типів трубок різної довжини за результату розрахунку має більше 20 власних частот в частотному діапазоні від 500 Гц до 4500 Гц, тобто частотний діапазон поглинання є досить широким. Для перевірки теоретичних розрахунків за допомогою 3D принтера були виготовлені дослідні зразки запропонованої звукопоглинаючої конструкції, а також реальної звукопоглинаючої конструкції, що застосовується для зниження шуму ТРДД Д-18Т та проведені їх експериментальні дослідження. Результати дослідження показують, що запропонована конструкція знижує шум в широкому частотному діапазоні. В частотному діапазоні від 1300 Гц до 3500 Гц коефіцієнт звукопоглинання перевищує 0.4, а в діапазоні від 1500 Гц до 2600 Гц коефіцієнт звукопоглинання знаходиться вище значення 0.5. На вказаних частотних діапазонах запропонована конструкція має значні переваги порівняно з конструкцією Д-18Т. За рахунок зменшення поперечного перерізу трубок, або збільшенню кількості трубок дослідного зразка є можливість значно збільшити частотний діапазон звукопоглинання.

**Ключові слова:** авіаційний шум; ТРДД; шум вентилятора; звукопоглинаючі конструкції; коефіцієнт звукопоглинання; метод стоячої хвилі.

### Введення

Авіаційний шум є однією з ключових проблем для розробників літаків та іншої авіаційної техніки, оскільки він негативно впливає на населення, що проживає поблизу аеропортів. Стрімке виробництво літаків для транспортних та пасажирських перевезень призвело до значного збільшення кількості зльотів та посадок літаків в аеропортах, та до збільшення негативного впливу шуму. За даними [1, 2] значна кількість європейських аеропортів приймає від 50 000 до 300 000 літаків на рік, що складає від 140 до 800 зльотів та посадок на день, тобто населення, що проживає поблизу цих аеропортів постійно знаходиться під впливом авіаційного шуму. Крім того порівню-

ючи дані досліджень Європейського Агентства з довкілля за 2012 [1] та за 2017 роки [2] видно, що кількість людей, що зазнає впливу авіаційного шуму зростає з 3 мільйонів до 3.1 мільйона.

Для боротьби з авіаційним шумом були розроблені міжнародні стандарти [3], які нормують рівні шуму для авіаційного транспорту, що розробляється. Зараз для літаків з турбореактивними двоконтурними двигунами (ТРДД), діють вимоги глави 14 [3], що на 7 ЕРНДБ жорсткіші за вимоги глави 4 [3] (за вимогами глави 4 була проведена сертифікація літаків Ан-148-100 та Ан-158), та на 17 ЕРНДБ жорсткіші за вимог глави 3 [3] (за вимогами глави 3 була проведена сертифікація літаків Ан-124-100 та Ан-225). Слід зазначити, що міжнародні вимоги до авіаційного шуму постійно посилюються.

Для боротьби з авіаційним шумом одним із методів є застосування звукопоглинаючих конструкцій (ЗПК), що розміщуються в мотогондолах ТРДД.

### 1. Постановка задачі

Найпоширеніші конструкції ЗПК, що застосовуються в ТРДД, являють собою одношарові [4, 5] або двошарові конструкції [6], що складаються з наступних складових: перфорованого листа, наповнювача у вигляді стільникових або трубчатих комірок, жорсткої задньої стінки. Такі конструкції ЗПК працюють аналогічно резонатору Гельмгольца і краще всього підходять для зниження тональних складових авіаційного шуму, наприклад шуму вентилятора. При розробці сучасних конструкцій ЗПК слід орієнтуватися не тільки на поглинання тонального, а й широкополосного шуму.

Для розширення частотного діапазону звукопоглинання пропонується конструкція, наповнювач якої складається з трубок. Частина трубок з'єднана між собою та утворює трубки більшої довжини при незмінній висоті наповнювача. Збільшення довжини трубок в наповнювачі приведе до збільшення кількості власних частот на яких буде відбуватиметься поглинання звуку, тобто до розширення частотної області звукопоглинання

Власна частота коливання повітря в трубці  $f_b$  довжиною  $l$ , що відкрита з одного кінця, та закрита з іншого визначається за формулою (1) [7].

$$f_b = \frac{c}{4l}(2n+1), \quad (1)$$

де  $c$  – швидкість звуку в повітрі, м/с;

$l$  – довжина трубки, м;

$n$  – номер гармоніки ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Для прикладу якщо конструкція ЗПК буде складатися тільки з трубок 30 мм та 90 мм, то власні частоти такої ЗПК будуть мати значення 940 Гц, 2830 Гц, 4720 Гц, 6110 Гц, 8500 Гц. Розрахунок власних частот показує, що конструкція навіть з двох трубок 30 мм та 90 мм буде поглинати шум в діапазоні від 900 Гц до 8500 Гц, а максимальні значення коефіцієнта поглинання будуть на резонансних частотах. При збільшенні кількості трубок різної довжини буде відповідно збільшуватись ширина діапазону поглинання та кількість власних частот конструкції.

Оцінку діапазону звукопоглинання конструкції ЗПК можна відобразити за допомогою залежності між коефіцієнтом передачі амплітуд  $\beta$  [8] та частотою  $f$ . Коефіцієнт передачі амплітуд  $\beta$  визначається по формулі (2) [8].

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_b}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\gamma}{\pi}\right)^2 \left(\frac{f}{f_b}\right)^2}}, \quad (2)$$

де  $f$  – частота збуджуючих коливань, Гц;

$\gamma$  – логарифмічний декремент затухання.

Дослідна конструкція складається з трубок, що мають еквівалентну довжину в діапазоні від  $l_n$  до  $7l_n$ , де  $l_n$  – це товщина наповнювача. Для кожної трубки розраховуються власні частоти по формулі (1). Результат розрахунку приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результат розрахунку власних частот коливання повітря в трубках дослідної ЗПК

n	Номера трубок						
	1	2	3	4	5	6	7
	Власні частоти коливання повітря в трубках, Гц						
0	2833	1417	944	708	567	472	405
1	8500	4250	2833	2125	1700	1417	1214
2	—	7083	4722	3542	2833	2361	2024
3	—	—	6611	4958	3967	3306	2833
4	—	—	8500	6375	5100	4250	3643

Для оцінки діапазону звукопоглинання на рис. 2 наведено результат розрахунку коефіцієнта передачі амплітуд  $\beta$  по частоті, що наведені у таблиці 1.

При розрахунку значення  $\beta$  не враховувалося реальне поглинання звуку в трубках дослідної ЗПК на кожній частоті, оскільки такий параметр розрахувати досить складно, тому для демонстрації діапазону поглинання дослідної конструкції ЗПК значення  $\gamma$  вибиралося таким, що відповідає коефіцієнту звукопоглинання  $\alpha = 0.3$  на кожній власній частоті конструкції.

Результат розрахунку, наведений в таблиці 1 та на рис. 1 показує можливість створення конструкції в якій поглинання звуку буде відбуватися в широкому частотному діапазоні завдяки наповнювачу ЗПК, що складається з трубок різної довжини.

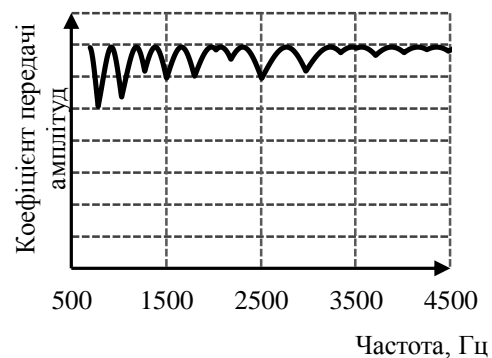


Рис. 1. Залежність між коефіцієнтом передачі амплітуд  $\beta$  та частотою збуджуючої сили

Для підтвердження теоретичних розрахунків була спроектована та виготовлена за допомогою 3D принтера дослідна конструкція ЗПК №8, що зображена на рис. 2. В дослідній конструкції ЗПК наповнювач має висоту 30 мм, що відповідає товщині конструкцій ЗПК в мотогондолах двигунів, та складається з прямокутних трубок. Частина трубок наповнювача з'єднана між собою для збільшення шляху руху звукової хвилі в трубках в діапазоні від  $1_n$  до  $7_l_n$ .



Рис. 2. Дослідна конструкція ЗПК

Дослідження коефіцієнта звукопоглинання були проведені на експериментальній установці, яка дозволяє виміряти параметри конструкцій ЗПК за допомогою метода стоячої хвилі [9].

## 1. Результати

Результати вимірювання коефіцієнта поглинання дослідної конструкції ЗПК №8 приведені на рис. 3 разом з результатами вимірювання конструкції ЗПК двигуна Д-18Т.

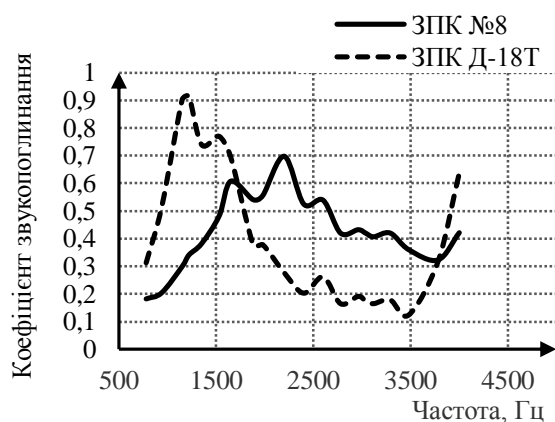


Рис. 3. Результати вимірювання коефіцієнтів звукопоглинання ЗПК №8 та ЗПК Д-18Т

Результат вимірювання показують, що підтверджена можливість створення конструкції ЗПК, що поглинає шум в широкому частотному діапазоні. В частотному діапазоні від 1300 Гц до 3500 Гц коефіцієнт звукопоглинання перевищує 0.4, а в діапазоні від 1500 Гц до 2600 Гц коефіцієнт звукопоглинання знаходиться вище значення 0.5. Також результати вимірювань показують, що в наведених частотних діапазонах коефіцієнти звукопоглинання перевищують значення для конструкції Д-18Т.

Слід зазначити, що не дивлячись на значні переваги у зниженні широкополосного шуму для дослідного зразка ЗПК №8, зменшення тонального шуму є все ще недостатнім, що видно з рис. 3.

Для збільшення коефіцієнту звукопоглинання слід розглянути можливість зменшення поперечних розмірів трубок наповнювача, тобто збільшити їх кількості в наповнювачі. Необхідно також проаналізувати яку саме кількість трубок слід з'єднувати між собою для збільшення ширини полоси звукопоглинання, оскільки з даних розрахунків в таблиці 1 видно, що частина трубок з різними номерами мають однакові власні частоти.

## Висновки

Авіаційний шум негативно впливає на населення, що проживає поблизу аеропортів та лишається однією з основних проблем для розробників літаків. Для зниження авіаційного шуму використовують ЗПК, які знайшли застосування у зниженні головного джерела авіаційного шуму – шуму, що створює ТРДД, особливо шуму вентилятора. При проектуванні сучасних ЗПК слід приділити увагу у зниженні як тонального так і широкополосного шуму. Для зниження шуму в широкому частотному діапазоні запропоновано конструкцію ЗПК, наповнювач якої складається з трубок різної довжини, причому висота самого наповнювача залишається незмінною. Наведено розрахунок власних частот наповнювача, а також показано можливість зниження шуму запропонованої конструкції в широкому частотному діапазоні. Для підтвердження ефективності конструкції було виготовлено дослідний зразок та проведені вимірювання коефіцієнта звукопоглинання дослідного зразка. Результат вимірювання показав, що запропонована ЗПК дійсно знижує шум в достатньо широкому частотному діапазоні. Результати вимірювання також показують, що необхідно збільшити значення коефіцієнта звукопоглинання, а також розширити частотний діапазон. Одним і варіантів вдосконалення запропонованої конструкції є зменшення поперечного розміру самих трубок.

## Література

1. *Noise in Europe 2014 [Text] : European Environment Agency report No 10/2014. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. DOI: 10.2800/763331.*
2. *Environment noise in Europe – 2020 [Text] : European Environment Agency report No 22/2019. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. DOI: 10.2800/686249.*
3. *Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Том 1. Авиационный шум. Издание восьмое [Текст]. – Монреаль : Международная организация гражданской авиации. – 2017. – 264 с.*
4. *Munas, R. The impingement flow study on the temperature profile perforated plate [Electronic resource] / R. Munas, M. A. Ismail, A. M. Muzathik // Researchgate. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/361030311>. – 10.03.2023.*
5. *Experimental Study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects [Text] / M. Dannemann, M. Kucher, E. Kunze [et al.] // Appl. Sci. – 2018. – Vol. 8, Iss. 10. – Article No. 1923. DOI: 10.3390/app8101923.*
6. *Versavel, M. Folded spiral-shaped cavities for nacelle acoustic liners: Impedance and attenuation modelling and comparison to experimental results [Electronic resource] / M. Versavel, L. Moreau // Researchgate. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/31382014>. – 10.03.2023.*
7. *Ржевкин, С. Н. Курс лекций по теории звука [Текст] / С. Н. Ржевкин. – М. : МГУ, 1960. – 336 с.*
8. *Ананьев, И. В. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование [Текст] / И. В. Ананьев, П. Г. Тимофеев. – М. : Машиностроение, 1965. – 526 с.*
9. *ISO 10534-1. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: method using standing wave ratio [Text]. – Geneva. International Organization for Standardization, 1996. – 24 p.*

## References

1. *Noise in Europe 2014. European Environment Agency report No 10/2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. DOI: 10.2800/763331.*
2. *Environment noise in Europe 2020. European Environment Agency report No 22/2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. DOI: 10.2800/686249.*
3. *Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Environmental protection. Volume I. Aircraft noise. Eighth Edition. Montreal. International civil aviation organization Publ., 2017, 264 p. (in Russian).*
4. *Munas, R., Ismail, M. A. & Muzathik, A. M. The impingement flow study on the temperature profile perforated plate. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/361030311>. (accessed 10.03.2023).*
5. *Dannemann, M., Kucher, M., Kunze, E., Modler, N., Knobloch, K., Enghardt, L., Sarradj, E. & Hoschle, K. Experimental Study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects. Appl. Sci., 2018, vol. 8, iss. 10, article no. 1923. DOI: 10.3390/app8101923.*
6. *Versavel, M., Moreau, L. Folded spiral-shaped cavities for nacelle acoustic liners: Impedance and attenuation modelling and comparison to experimental results. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/31382014>. (accessed 10.03.2023).*
7. *Rzhevkin, S. N. Kurs lekcij po teorii zvuka [Course of lectures on the theory of sound]. Moscow, MHU Publ., 1960. 336 p.*
8. *Anan'ev, I. V. & Timofeev, P. G. Kolebanija uprugih sistem v aviacionnyh konstrukcijah i ih dempfirovanie [Vibrations of elastic systems in aircraft structures and their damping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 526 p.*
9. *ISO 10534-1. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: method using standing wave ratio. Geneva. International Organization for Standardization, 1996. 24 p.*

Надійшла до редакції 02.05.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

## RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC LINERS FOR TURBOFAN ENGINES

*Yevhen Rymarenko*

**The subject** of the research in this article is an acoustic liner designed to reduce aircraft noise in a wide frequency range. **The purpose** of the study is to determine the acoustic characteristics of an acoustic liner. **Tasks:** development of a theoretical model of the acoustic liner in the form of tubes of different lengths, calculation of the natural frequencies of each tube of the developed liner, determination of the frequency range in which sound absorption will occur, production of a test sample, and experimental determination of the sound absorption coefficient. An experimental setup is used to determine the sound absorption coefficient of the developed liner, which determines the acoustic characteristics of the acoustic liners using the standing wave **method**. This study presents **the results** of: calculation of the natural frequencies of the proposed liner, calculation of the dependence between the amplitude transmission coefficient and the frequency of the exciting force, and measurement of the acoustic characteristics of the proposed

acoustic liner. **The scientific and practical novelty** of the obtained results is as follows: to solve the problem of noise absorption in a wide frequency range, a theoretical model of the acoustic liner, which should consist of tubes of different lengths, was developed. Each tube has its own frequency of oscillation of the air inside the tube. As the path of sound travel inside the tube increases, the natural frequency of the tube decreases. When tubes of different lengths are placed on the test sample, it is possible to obtain an acoustic liner with a significant number of natural frequencies, that is, noise will be absorbed in a wide frequency range. According to the calculation results, the proposed acoustic liner, consisting of seven types of tubes of different lengths, has more than 20 natural frequencies in the frequency range from 500 Hz to 4500 Hz, that is, the frequency range of absorption is quite wide. In order to verify the theoretical calculations with the help of a 3D printer, experimental samples of the proposed acoustic liner, as well as a real acoustic liner used to reduce the noise of the D-18T engine, were made and their experimental studies were carried out. The research results show that the proposed acoustic liner reduces noise in a wide frequency range. In the frequency range from 1300 Hz to 3500 Hz, the sound absorption coefficient exceeds 0.4, and in the range from 1500 Hz to 2600 Hz, the sound absorption coefficient is above 0.5. In the specified frequency ranges, the proposed acoustic liner has significant advantages over the D-18T acoustic liner. By reducing the cross-section of the tubes, or increasing the number of tubes of the experimental sample, it is possible to significantly increase the frequency range of sound absorption.

**Keywords:** aviation noise; turbofan engine; fan noise; acoustic liners; sound-absorption coefficient; standing wave method.

**Римаренко Євген Олександрович** – начальник відділу вібрації та акустики, ДП "АНТОНОВ", Київ, Україна.

**Yevhen Rymarenko** – Head of Vibration and Acoustic Department of Antonov Company, Kyiv, Ukraine, e-mail: acoustic.noise.civilian@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1789-9529.