

УДК 621.452.22:534.83

doi: 10.32620/aktt.2020.8.15

Є. О. РИМАРЕНКО

ДП "АНТОНОВ", Київ, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ЗВУКОПОГЛИНАЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Приведено огляд сучасних міжнародних вимог щодо авіаційного шуму. Показано, що міжнародні вимоги до рівнів шуму літаків постійно посилюються. Стрімке зростання міжнародного авіапарку призводить до збільшення кількості зльотів та посадок літаків у аеропортах, і як наслідок проблема авіаційного шуму залишається актуальною. Для зниження рівнів шуму у аеропортах застосовуються різноманітні методи, одним з яких є експлуатаційні обмеження щодо літаків відносно рівнів шуму, який вони створюють. У країнах Європейського союзу діють експлуатаційні обмеження для літаків, що відповідають вимогам глави 3 з запасом до шуму менше 10 EPNdB. Для вже створених літаків, що пройшли сертифікацію, знову необхідно шукати методи зниження шуму. Основним типом літака, що експлуатується у світі є літак з турбореактивними двоконтурними двигуном. Для такого літака основними джерелами шуму при зльоті будуть шум вентилятора та реактивного струменя, а при посадці шум шасі, закритків, передкрилків та шум вентилятора. При виборі способу зниження авіаційного шуму слід визначити джерело, яке найбільше впливає на загальний рівень шуму. Було визначено, що шум вентилятора є одним із основних джерел шуму. Для зниження рівня шуму, що створює вентилятор широко застосовуються звукопоглинаючі конструкції (ЗПК), вони є одним з найбільш пріоритетних напрямків зниження шуму вентилятора. Розглянуто досягнення у застосуванні ЗПК для боротьби із шумом вітчизняних літаків Ан-124-100, Ан-148-100. Зазначено, що у зв'язку зі зростанням вимог щодо авіаційного шуму необхідне застосування нових ЗПК з покращеними поглинальними властивостями. Визначено, що покращення поглинальних властивостей ЗПК можливо досягти завдяки розширенню частотного діапазону поглинання таких конструкцій. Наведені сучасні методи покращення акустичних властивостей ЗПК: використання багатошарових резонансних ЗПК дає можливість налаштування конструкції через збільшену кількість параметрів розрахунку; застосування модифікованих варіантів наповнювача ЗПК таких як гофровані наповнювачі, перфоровані наповнювачі збільшеного розміру; використання пористих та пористоволокниватих матеріалів у конструкції ЗПК для забезпечення додаткової звукопоглинальної властивості, використання низькочастотних ЗПК для зниження шуму перспективних двигунів з високим ступенем двоконтурності.

Ключові слова: Авіаційний шум; експлуатаційні обмеження відносно рівнів шуму; газотурбінний двигун; турбореактивний двоконтурний двигун; шум вентилятора; звукопоглинаючі конструкції; наповнювач звукопоглинальної конструкції; багатошарові звукопоглинальні конструкції; пористий матеріал; низькочастотні звукопоглинальні конструкції.

Введення

Проблема авіаційного шуму, що виникла в середині XX століття є наслідком стрімкого розвитку авіаційних пасажирських та вантажних перевезень. Не дивлячись на те, що на сьогоднішній день вплив авіаційного шуму на населення значно менший, ніж вплив від шуму дорожнього та залізничного транспорту [1] (так у країнах Європейського союзу шкідливого впливу шуму зазнають біля 125 мільйонів людей від дорожнього транспорту, біля 8 мільйонів від залізничного транспорту та біля 3 мільйонів від авіаційного [1]) авіаційний шум, що характеризується стрімким виникненням та достатньо високими рівнями звуку [2] може сприяти виникненню різноманітних захворювань у населення [3]. Впливу авіа-

ційного шуму зазнають пасажирів та екіпаж літака [4], а також працівники аеропортів, підприємств та населення, що знаходиться поблизу аеропортів [5, 6]. Для виробників авіаційної техніки зниження рівнів шуму літака може значно вплинути на його конкурентоспроможність, особливо при постійному посиленні вимог щодо шуму на місцевості [7]. Вирішення проблеми зменшення авіаційного шуму є актуальним, особливо для авіаційної промисловості України.

Метою роботи є: огляд сучасного стану міжнародних нормативних вимог щодо авіаційного шуму, визначення основних джерел шуму літака, визначення необхідності зниження шуму вентилятора, огляд сучасних підходів до боротьби з шумом вентилятора за допомогою звукопоглинаючих конструкцій.

1. Постановка задачі

1.1. Міжнародні вимоги щодо авіаційного шуму

Починаючи з середини ХХ століття авіаційному шуму почали приділяти значну увагу, хоча до 70-х років авіаційний шум був одним з найменш пріоритетних напрямків розвитку авіації [8]. Проте з уведенням у дію Додатку 16 до конвенції про міжнародну цивільну авіацію (далі Додаток 16 ІКАО) [9] проблемі авіаційного шуму почали приділяти значно більшу увагу і на сьогоднішній день зниження шуму літаків є одним з найбільш пріоритетних напрямків розвитку авіації [8].

Міжнародні вимоги, щодо шуму літаків постійно змінювались. Так, порівняно з вимогами глави 3 Додатку 16 [9], що діяли майже 30 років, сучасні вимоги глави 14 жорсткіші на 17 ЕРNdБ. На рис. 1 показано зміну вимог, щодо рівня шуму на місцевості починаючи з уведення у дію вимог глави 2 Додатку 16 [9].

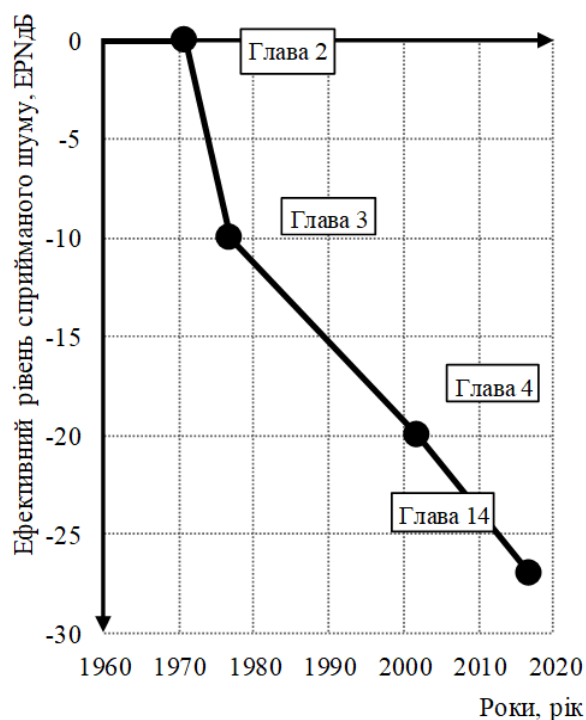


Рис. 1. Динаміка посилення вимог щодо рівня шуму на місцевості

Поряд з міжнародними вимогами щодо сертифікації літаків [9] міжнародна спільнота приділяє значну увагу зменшенню шуму у аеропортах, оскільки незважаючи на зниження шуму нових літаків постійно зростає їх кількість, так з 2006 року світовий пасажиропотік збільшився у 1,6 разів [10, 11],

що, звичайно, пов'язано зі збільшенням кількості літаків. Збільшення кількості літаків у аеропортах призводить до того, що шум на прилеглих до аеропортів територіях знижується повільніше. У 2001 році було прийнято резолюцію А33-7 ІКАО [12] в рамках якої було прийнято концепцію балансованого підходу з керування авіаційним шумом, тобто схваленого на міжнародному рівні підходу з вирішення проблеми шуму в окремих аеропортах. Згідно зі збалансованим підходом одним з напрямків зниження шуму в аеропортах є експлуатаційне обмеження літаків, що не відповідають вимогам із шуму. Так у країнах Європейського союзу на сьогоднішній день діє Постанова ЄС № 598/2014 [13], яка обмежує експлуатацію звукових реактивних літаків, що відповідають вимогам глави 3 Додатку 16 ІКАО з запасом до шуму менше 10 ЕРNdБ.

Якщо розглянути літаки, що виготовлені більше 20 років тому та продовжують експлуатуватися, як наприклад Ан-124-100 [12] (відповідає вимогам глави 3 Додатку 16 ІКАО), то згідно з Постановою ЄС № 598/2014 [13] він вже не може експлуатуватися у аеропортах, що відповідають умовам, зазначеним у Постанові, а це значна кількість найбільших аеропортів Європейського союзу. Крім того, згідно з [12] не тільки країни Європейського союзу можуть вводити обмеження на експлуатацію.

Виробники авіаційної техніки, особливо українська авіаційна промисловість, зіштовхнулися із проблемами відповідності літаків, що розроблюються, сучасним сертифікаційним вимогам, а також із проблемою вдосконалення вже виготовлених літаків для відповідності сучасним вимогам щодо шуму у аеропортах. Причому проблема вдосконалення вже виготовлених літаків значно складніша для виробників авіаційної техніки.

2. Огляд основних джерел шуму літака. Методи боротьби з шумом за допомогою звукопоглинаючих конструкцій

2.1. Джерела шуму реактивного літака. Обґрунтування необхідності зниження шуму за допомогою звукопоглинаючих конструкцій

В якості прикладу розглядається літак з турбореактивним двоконтурним двигуном (ТРДД) з високим ступенем двоконтурності (більше 5), як основний тип літака, що експлуатується у світі та буде продовжувати експлуатуватися у майбутньому [15]. Джерела шуму літака можна розділити на дві групи: шум двигунів ТРДД та шум планера літака, у таблиці 1 показані джерела шуму літака [16 – 19].

Таблиця 1

Джерела шуму літака

Джерела шуму двигуна	Джерела шуму планера
Вентилятор	Фюзеляж
Компресор	Крило
Камера згорання	Закрилки
Турбіна	Передкрилки
Реактивний струмінь	Шасі
	Оперення
	Поверхня мотогондол

Для визначення впливу джерел шуму літака на його загальний рівень шуму слід розглянути особливості визначення рівня шуму літака на місцевості. Так за даними глави 3, глави 4 та глави 14 Додатку 16 ICAO [9] рівень шуму визначається у трьох контрольних точках на місцевості:

- точці збоку від злітно посадкової смуги (ЗПС) на режимі максимальної потужності, що знаходиться на лінії, паралельній осьовій лінії ЗПС та віддаленій від неї на 450 м, у якій рівень шуму при зльоті буде максимальним;

- у точці прольотного шуму, що знаходиться на продовженні осьової лінії ЗПС на відстані 6500 м від точки старту;

- у точці при заході на посадку, що знаходиться на землі на продовженні осьової лінії ЗПС на відстані 2000 м від порогу ЗПС.

Слід зазначити, що методика пілотування літака для визначення шуму в кожній точці вимірювання має свої особливості, тому і відрізняються режими роботи двигуна, швидкість польоту літака, положення механізації. Це призводить до того, що основні джерела можуть змінюватися. Так при зльоті на режимі максимальної потужності основними джерелами шуму є реактивний струмінь та вентилятор, а при заході на посадку основні джерела шуму – це шум шасі, шум планера (закрилки та передкрилки) та шум вентилятора [19]. Звичайно таке розподілення основних джерел може відрізнятися в залежності від конкретного літака.

Загальні рівні шуму літака є суперпозицією окремих джерел шуму (див. Таблицю 1), які складаються в широкому діапазоні частот від 50 Гц до 10000 Гц (в цьому діапазоні відбувається розрахунок шуму згідно з методикою Додатку 16 ICAO [9]). Області частот різноманітних джерел шуму відрізняються, так основні частоти шуму реактивного струменя коливаються у діапазоні від 100 Гц до 400 Гц, а шуму вентилятора та турбіни в області від 2000 Гц до 5000 Гц [16, 20].

Якщо розглянути особливості розрахунку шуму на місцевості згідно Додатком 16 ICAO [9], то можна виявити, що різні за частотою рівні шуму

неоднаково впливають на ефективні рівні шуму, що сприймаються у ЕРНдБ. Так, наприклад, на рис. 2 показана залежність між шумністю у ноях (ці величини є одним із проміжних етапів розрахунку ефективного рівня сприйманого шуму) та рівнями звукового тиску у третьоктавних полосах частот з центральними частотами 315 Гц та 3150 Гц (залежність побудовано за даними таблиці 3.6 Doc 9501 [21]). Рівні звукового тиску, що зображені на осі абсцис на рис. 2 відповідають тим рівням, що можна отримати під час вимірювання рівнів шуму на місцевості.

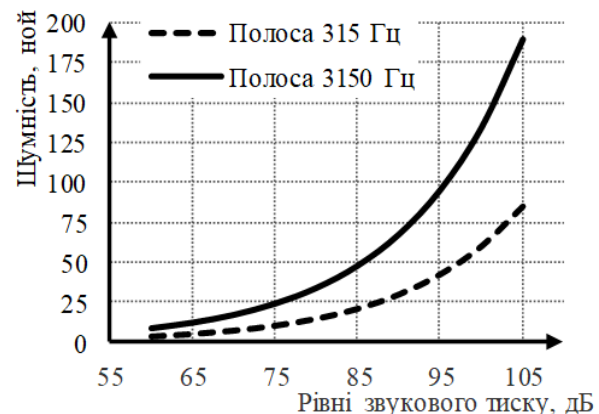


Рис. 2. Залежність між рівнем звукового тиску в дБ та шумністю у ноях для третьоктавних полос 315 Гц та 3150 Гц

Залежність на рис. 2 показує, що на високих частотах чутливість до шуму значно вище ніж на низьких, навіть при однакових рівнях звукового тиску.

З особливостей розрахунку авіаційного шуму літака випливає, що зниження шуму літака буде максимально ефективним, якщо спочатку знизити рівні шуму джерела, що має найбільший вплив на загальний рівень шуму. Причому вплив основного джерела шуму визначається не тільки рівнем звукового тиску джерела, а також його спектральним складом. Тому зменшення шуму вентилятора є одним з основних напрямків зниження шуму газотурбінного двигуна (ГТД), для забезпечення відповідності літака вимогам щодо шуму на місцевості.

2.2. Загальні відомості про шляхи зниження шуму вентилятора

До шляхів зниження шуму вентилятора можна віднести два основні напрямки [22]:

1. Зниження рівнів шуму у джерелі, тобто зміна елементів конструкції, наприклад, зміна форми лопаток робочого колеса вентилятора [23], зміна стрілоподібності лопаток робочого колеса та прямого апарату [15].

2. Зниження рівнів шуму під час проходження звуку по каналу розповсюдження звуку, тобто у каналах всмоктування та вихлопу двигуна.

Зниження рівня шуму за допомогою першого напрямку потребує вивчення впливу як на акустичні характеристики вентилятора, так і на характеристики тяги, витрат палива, міцності і т.д. Крім того, для експериментальної оцінки ефекту доробки необхідно проводити стендові натурні випробування, що потребує значних фінансових витрат.

Для зниження рівня шуму вентилятора за допомогою другого шляху застосовують звукопоглинаючі конструкції (ЗПК) в каналах ГТД. Застосування ЗПК у каналах ГТД є одним з найбільш перспективних напрямків зниження авіаційного шуму.

2.3. Застосування ЗПК для зниження авіаційного шуму

Широке застосування у практиці боротьби із шумом вентилятора ГТД отримали резонансні ЗПК. Перші ЗПК застосовувалися для боротьби з тональним шумом компресора або вентилятора ГТД, вони являли собою направлений до потоку перфорований лист, тверду основу та порожнину, що розділена на комірки [24]. З розвитком теорії резонансних ЗПК були сформовані основні рівняння розрахунку, що включали в себе не тільки параметри самих звукопоглинальних конструкцій, а й враховували нелінійні явища, що пов'язані зі зміною звукового тиску, що діяв на поверхню ЗПК, а також швидкість потоку повітря у каналах ГТД [25, 16].

Резонансні ЗПК застосовувалися для зниження шуму вітчизняних літаків. Впровадження одношарових комірчастих ЗПК дало змогу знизити рівень шуму двигуна Д-18Т та сертифікувати літак Ан-124-100 на відповідність вимогам глави 3 Додатку 16 ІКАО. Для зниження рівня шуму двигуна Д-436-148 вже були застосовані двошарові ЗПК, що дало змогу сертифікувати літак Ан-148-100 на відповідність глави 4 Додатку 16 ІКАО. Двошарові резонансні ЗПК застосовуються також в каналах двигуна Д-436-148ФМ літака Ан-178, який має відповідати вимогам глави 4 Додатку 16 ІКАО.

Не дивлячись на успіхи у застосуванні ЗПК, на сьогодні виникають нові завдання для зниження авіаційного шуму. Як було зазначено в п. 1.1, літаку Ан-124-100 необхідно знизити рівні шуму до вимог глави 4 Додатку 16 ІКАО для забезпечення експлуатації в аеропортах. Для більш сучасних розробок треба вже орієнтуватися на вимоги глави 14 Додатку 16 ІКАО, а ще краще – до відповідності більш жорстким вимогам. В таких умовах потенціал застосування одношарових та навіть двошарових ЗПК дуже слабкий через досить вузький частотний діапазон

поглинання, тому треба шукати інші конструктивні рішення.

Покращення акустичних характеристик ЗПК шляхом розширення частотного діапазону є основним пріоритетом у напрямку зниження шуму вентилятора. Це дозволить застосувати вже вивчені конструкції і для інших типів двигунів. Вивчення акустичних характеристик ЗПК тільки в лабораторних умовах відбувається шляхом вимірювання [26]:

- за допомогою акустичних інтерферометрів;
- в ревербераційних камерах;
- в акустичному каналі з потоком.

Крім того, обраний або обрані варіанти ЗПК потребують встановлення для вимірювання на випробувальних стендах ГТД, а це означає виготовлення повноцінного комплексу ЗПК. При розробці ЗПК з достатньо широкою частотною характеристикою поглинання можна уникнути необхідності досліджень розробки ЗПК для конкретного типу двигуна, а застосувати вже вивчені, що значно зменшить вартість досліджень у майбутньому.

Для покращення ЗПК шляхом розширення частотного діапазону звукопоглинання на сьогоднішній день розглядаються наступні методи:

- використання багатошарових резонансних ЗПК. Як правило розглядаються максимум трьохшарові варіанти ЗПК [27, 28] проте методики розрахунку використовуються і для багатошарових ЗПК. У приведених роботах демонструється збіжність результатів розрахунку з експериментом на акустичному інтерферометрі. При використанні багатошарових ЗПК розширюється можливість налаштування конструкції через збільшення кількості параметрів розрахунку;

- модифікація наповнювача (комірчастої структури) ЗПК. Один з методів покращення звукопоглинаючих можливостей ЗПК є модифікація наповнювача конструкції. У роботі [26] приведено експериментальні дослідження впливу збільшення розміру комірок ЗПК та впливу перфорації комірки на звукопоглинаючі властивості конструкції (також розглядається у [29]). При збільшенні розміру комірки та при перфорації стінок комірки можна досягти збільшення коефіцієнта звукопоглинання на частотах до 2000 Гц. Один із варіантів модифікації наповнювача – це зміна форми наповнювача. У [30] показано варіант ЗПК із наповнювачем у вигляді Z-гофрів з нахиленими зубцями до напрямку звукового потоку. За даними [30] така панель має високі звукопоглинаючі властивості у діапазоні частот від 1250 Гц до 6000 Гц. У роботі [22] приведено варіант конструкції наповнювача у вигляді трьох гофрованих поверхонь з товщинами гофрованих шарів, що знаходяться у відношенні числа Фібоначчі 1,618.

Задана конструкція являє собою як багат шаровий ЗПК, так і ЗПК з модифікованим наповнювачем. У роботі [22], що таку конструкцію планується встановити на двигуна Д-18Т серії 3М;

— використання пористих матеріалів. Використання пористих матеріалів у складі ЗПК один з перспективних напрямків боротьби із шумом [31]. Пористі матеріали являють собою тверді основи з великою кількістю пор або каналів. Завдяки такій структурі звукова хвиля проникає крізь матеріал та втрачає енергію під час руху. Також досліджуються і пористоволокнаваті матеріали, що виготовлені з металу [32]. За даними [31] використання пористих матеріалів дозволяє знизити шум у діапазоні від 800 Гц до 5000 Гц, а використання пористоволокнаватих матеріалів з високою пористістю [32] дозволить знизити шум в області частот від 1000 Гц до 10000 Гц;

— використання низькочастотних ЗПК. Низькочастотні ЗПК необхідні для зниження шуму перспективних двигунів з високим ступенем двоконтурності більше 10 [33] або для зниження шуму двигунів з великим діаметром робочого колеса вентилятора, як у двигуна Д-18Т. Через великий розмір (радіус робочого колеса) вентилятора периферія лопатки робочого колеса вентилятора рухається з надзвуковою швидкістю, що призводить до виникнення ударних хвиль у діапазоні від 300 Гц до 800 Гц [34]. У роботах [35, 36] описуються ЗПК, які дозволяють розширити частотний діапазон в бік низьких частот, що важливо при збереженні габаритної товщини ЗПК. У роботі [35] розглядається застосування Г-образних комірок для зниження шуму, а у роботі [36] – комірчаста структура з квадратною основою в середині якої знаходиться спіральна конструкція подібна до гелікоїду. Застосування такої спіральної конструкції дозволить збільшити шлях, який проходить звукова хвиля від зовнішнього шару до внутрішнього.

Висновки

Перед розробниками авіаційної техніки постійно виникають питання зниження авіаційного шуму. По-перше, через посилення вимог, щодо шуму на місцевості, а по-друге, через впровадження у аеропортах експлуатаційних обмежень для літаків, що не відповідають необхідним вимогам.

Для зниження шуму літака слід визначити пріоритетні напрямки, тобто зменшити шум саме тих джерел, що впливають на загальний рівень шуму літака.

Серед джерел шуму літака один із основних джерел є шум ГТД, а для більшості сучасних літаків шум ТРДД. При розгляданні джерел шуму літака в

першу чергу слід зменшити шум, що створює вентилятор.

Одним з найперспективніших напрямків для зниження шуму вентилятора є застосування ЗПК. Існуючі варіанти ЗПК, що дозволили знизити рівень шуму літака Ан-124-100 та використовуються для зниження шуму більш сучасних вітчизняних літаків вже не можуть забезпечити подальшого зниження шуму.

Покращення звукопоглинальних властивостей ЗПК досягається за допомогою розширення частотного діапазону поглинання. Сучасними підходами до покращення ЗПК є розробка багат шарових резонансних ЗПК, модифікація наповнювача ЗПК, використання пористих матеріалів, розширення полоси поглинання за рахунок впровадження низькочастотних ЗПК.

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. Сазонов, Э. В. Оценка шумового загрязнения территории поселений, находящейся в зоне влияния аэродромов [Текст] / Э. В. Сазонов, И. А. Сухорукова // Вестник МГСУ. – 2012. – Т. 7, Вып. 2. – С. 130–134. DOI:10.22227/1997-0935.2012.2.130-134.

3. Бжезовська, Н. В. Проблеми впливу авіаційного шуму на навколишнє середовище та засоби їх вирішення [Електронний ресурс] / Н. В. Бжезовська, А. О. Наконечна // Проблеми розвитку міського середовища. – 2018 – Вип. 2(21). – С. 26–34. – Режим доступу <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/35066> – 13.05.2020.

4. Токарев, В. І. Авіаційний шум, як проблема охорони навколишнього середовища [Текст] / В. І. Токарев, О. І. Запорожець // Вісник НАУ. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 457–465. DOI: 10.18372/2306-1472.1.11165.

5. Запорожець, О. І. Оцінювання шумового впливу від повітряних суден в районі аеропорту [Текст] / О. І. Запорожець, Л. О. Левченко // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 1(102). – С. 121–128

6. Сучасні підходи до зниження рівнів шуму поблизу підприємств з неперервним циклом виробництва [Текст] / В. А. Глива, Л. О. Левченко, О. Я. Свтулюнок и др. // Вісник НТУУ "КПІ". Сер.: Гірництво. – 2011. – № 20 – С. 223–228. DOI: 10.20535/2079-5688.2011.20.54582.

7. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения [Электронный ресурс] / Л. Б. Метечко, А. И. Тихонов, А. Е. Сорокин и др. // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 85. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67495> – 13.05.2020.

8. Zaporozhets, O. Aircraft noise. Assessment, prediction and control [Text] / O. Zaporozhets, V. Tokarev, K. Attenborough. – Abingdon : Spon Press, 2011. – 433 p.

9. 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.

10. Бутов, А. М. Рынок продукции гражданского авиастроения [Электронный ресурс] / А. М. Бутов // Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики". – Режим доступа: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/11/19/1141804200/Рынок%20продукции%20гражданского%20авиастроения%202018.pdf>. – 14.05.2020.

11. Годовой доклад совета ИКАО за 2016 год. Статистические данные о результатах деятельности воздушного транспорта в 2016 году [Электронный ресурс] // Международная организация гражданской авиации. – Режим доступа: https://www.icao.int/annual-report-2016/Documents/ARC_2016_Air%20Transport%20Statistics_ru.pdf. – 14.05.2020.

12. Doc 9829. Инструктивный материал по сбалансированному подходу к управлению авиационным шумом. Издание восьмое [Текст]. – Канада : Международная организация гражданской авиации, 2008. – 130 с.

13. Regulation (EU) No 598/2014 of the European parliament and of the Council of 16 April 2014 on the establishment of rules and procedures with regard to the introduction of noise-related operating restrictions at Union airports within a Balanced Approach and repealing Directive 2002/30/EC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0598&from=EN>. – 15.05.2020.

14. Типи повітряних суден, що схвалені для експлуатації в цивільній авіації України [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2017/05/TL-0021.pdf>. – 15.05.2020.

15. Попуга, А. И. Основные направления уменьшения шума воздушных судов. [Электронный ресурс] / А. И. Попуга // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №9(126). – С. 20–25. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2015_9_5. – 16.05.2020.

16. Мунин, А. Г. Авиационная акустика [Текст]. В 2-ч. Ч. 1. / А. Г. Мунин. – М. : Машиностроение, 1986. – 243 с.

17. Smith, M. J. T. Aircraft noise [Text] / M. J. T. Smith. – Cambridge : Cambridge University Press, 1989. – 359 p.

18. Самохин, В. Г. Шум ГТД. Введение в авиационную акустику [Текст] / В. Г. Самохин. – М. : Изд-во МАИ, 2007. – 152 с.

19. Bertsch, L. Aircraft Noise: The major sources, modelling capabilities, and reduction possibilities [Electronic resource] / L. Bertsch, D. G. Simons,

M. Snell // Researchgate. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/274587628_Aircraft_Noise_The_major_sources_modelling_capabilities_and_reduction_possibilities. DOI: 10.34912/ac-n0is3. – 17.05.2020.

20. Развитие методов и средств автоматизированного концептуального проектирования авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных энергетических установок [Электронный ресурс] / А. Б. Михайлова, Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Михайлови др. // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 3 (56). – С. 69–78. – Режим доступа: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1549>. – 17.05.2020.

21. Doc 9501. Техническое руководство по окружающей среде. Том 1. Методики сертификации воздушных судов по шуму. Издание второе [Текст]. – Канада : Международная организация гражданской авиации, 2015 г. – 296 с.

22. Яловенко, Е. В. Звукопоглощающая панель газотурбинного двигателя на базе иррационального числа Фибоначчи [Текст] / Е. В. Яловенко, В. Н. Журавлёв // Авиационно-космическая техника и технология – 2016. – № 8(135). – С. 55 – 60.

23. Водопьян, Е. А. Анализ методов снижения авиационного шума в источнике и на местности [Текст] / Е. А. Водопьян, Т. Н. Середа, В. И. Рябков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2019. – № 84. – С. 144 – 156. DOI: 10.32620/oikit.2019.84.07.

24. Мунин, А. Г. Авиационная акустика [Текст] / А. Г. Мунин, В. Е. Квитка. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.

25. Мунин, А. Г. Аэродинамические источники шума [Текст] / А. Г. Мунин, В. М. Кузнецов, Е. А. Леонтьев. – М. : Машиностроение, 1981. – 248 с.

26. Постнов, В. И. Исследования оптимизации выбора звукопоглощающих конструкций [Текст] / В. И. Постнов, В. Н. Вязин, Е. А. Вешкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27). – С. 55 – 64.

27. Бакланов, В. С. Расчёт резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей [Текст] / В. С. Бакланов, С. С. Постнов, Е. А. Постнова // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19, № 8. – С. 22–30.

28. Расчётно экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций [Текст] / А. Н. Аношкин, А. Г. Захаров, Н. А. Городкова и др. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 1. – С. 5–20. DOI: 10.15593/permech/2015.1.01.

29. Пат. 2478762. Российская Федерация, МПК Е04В 1/84, В32В 3/12, G10К 11/16, Шумозащитная панель [Текст] / С. А. Пяткина, А. П. Тюрин, Д. В. Парахин, Б. В. Севастьянов, А. П. Савельев, В. С. Баязитов, Д. А. Векишин; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. бюджет. образов. учрежд. высш. професион. образов. "Ижевский гос.

универс. им. М. Т. Калашникова". – № 2011132233/03; заявл. 29.07.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. №10. – 8 с.

30. Пат. 2307216. Российская Федерация, МПК E04B 1/86, G10K 11/16. Звукопоглощающая панель [Текст] / В. В. Кривонос, Г. Ф. Железина, И. Н. Гуляев, Н. А. Соловьева, В. В. Сидорова, В. М. Фадеева, Н. А. Егорова, В. И. Халиуллин, И. В. Двоеглазов, Д. Г. Меняшкин; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унит. предпр. "Всерос. научн.-исслед. инст. авиац. матер." (ФГУП "ВИАМ"). – № 2005140791/03; заявл. 27.12.2005; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27. 5 с.

31. Шульдешов, Е. М. Полимерный звукопоглощающий материал конструкция для снижения шума на местности авиационных двигателей [Текст] / Е. М. Шульдешов, И. Д. Краев, А. П. Петрова // Труды ВИАМ. – 2018. – № 2 (62). – С. 47–52. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-6-6.

32. Пористоволокнистый металлический материал для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей [Текст] / Д. П. Фарафонов, В. П. Мизунов, М. Л. Деговец и др. // Труды ВИАМ. – 2016. – № 4 (40). – С. 3–12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-1-1.

33. Кузнецов, В. М. Проблемы снижения шума пассажирских самолётов [Текст] / В. М. Кузнецов // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49, № 3. – С. 293–317.

34. Бакланов, В. С. Виброакустика самолётов нового поколения с двигателями большой и сверхбольшой степени двухконтурности [Текст] / В. С. Бакланов // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19, № 7. – С. 27–38.

35. Sugimoto, R. Folded Cavity Liners for Turbofan Engine Intakes [Electronic resource] / R. Sugimoto, P. Murray, R. J. Astley // Researchgate. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/268582852>. DOI: 10.2514/6.2012-2291. – 20.05.2020.

36. 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>. – 21.05.2020.

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. Sazonov, Je. V., Suhorukova, I. A. Ocenka шумового загрознення території поселеній, нахджашеї в зоні впливу аеродромів [Assessment of noise pollution in the territory of settlements located in the zone of influence of aerodromes]. Vestnik MGSU, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 130–134. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.2.130-134.

3. Bzhezov'ska, N. V., Nakonechna A. O. Problemy` vply`vu aviacijnogo shumy na navkoly`shnye seredovy`shhe ta zasoby` yix vy`rishennya [Problems of aviation noise impact on the environment and means of their solution]. Problemy` rozvy`tku mis`kogo seredovy`shha, 2018, no. 2(21), pp. 26–34. Available at: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/35066> – (accessed 13.05.2020) (In Ukrainian).

4. Tokarev, V. I., Zaporozhecz`, O. I. Aviacijny`j shum, yak problema oxorony` navkoly`shn`ogo seredovy`shha. [Aviation noise as a problem of environmental protection]. Visny`k NAU, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 457–465. DOI: 10.18372/2306-1472.1.11165.

5. Zaporozhecz`, O. I., Levchenko, L. O. Ocinyuvannya шумового впливу від повітряних суден в районі аеропорту. [Estimation of noise impact from aircraft in the airport area]. Visny`k KrNU im. My`xajla Ostrograds`kogo, 2017, no. 1 (102), pp. 121–128.

6. Gly`va, V. A., Levchenko, L. O., Yevtushonok, O. Ya., Xry`stun, O. Ya. Suchasni pidxody` do zny`zhennya rivniv shumy pobly`zu pidpry`emstv z neperervny`m cy`kлом vy`robn`cztva. [Modern approaches to noise reduction near enterprises with a continuous production cycle]. Visny`k NTUU "KPI". Seriya "Girny`cztvo", 2011, no. 20, pp. 223–228. DOI: 10.20535/2079-5688.2011.20.54582.

7. Metechko, L. B., Tihonov, A. I., Sorokin, A. E., Novikov, S. V. Vlijanie jekologicheskix normativov na razvitie aviacionnogo dvigatelestroenija. [The impact of environmental standards on the development of aircraft engine]. Trudy MAI, 2016, vol. 85. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67495> (accessed 13.05.2020) (in Russian).

8. Zaporozhets, O., Tokarev, V., Attenborough, K. Aircraft noise. Assesment, prediction and control, Abingdon, Spon Press, 2011. 433 p.

9. 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).

10. Butov, A. M. Rynok produkciї grazhdanskogo aviastroenija [Civil Aircraft Market]. Nacional`nyj issledovatel`skij universitet "Vysshaja shkola jekonomiki". Available at: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/11/19/1141804200/Рынок%20продукции%20гражданского%20авиастроения%202018.pdf> (accessed 14.05.2020) (in Russian).

11. ICAO Council Annual Report 2016. Statistical data on the results of air transport in 2016. Available at: https://www.icao.int/annual-report-2016/Documents/ARC_2016_Air%20Transport%20Statistics_ru.pdf (accessed 14.05.2020) (in Russian).

12. Doc 9829. Guidance on the balanced approach to aircraft noise management. Second edition. Montreal, International civil aviation organization Publ., 2008. 130 p. (in Russian).

13. Regulation (EU) No 598/2014 of the European parliament and of the Council of 16 April 2014 on the establishment of rules and procedures with regard to

the introduction of noise-related operating restrictions at Un-ion airports within a Balanced Approach and repealing Directive 2002/30/EC. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0598&from=EN> (accessed 15.05.2020)

14. Typy povitryanykh suden, shcho skhvaleni dlya ekspluata-tsiyi v tsyvil'niy aviatsiyyi Ukrayiny [Types of aircraft approved for operation in civil aviation of Ukraine]. Available at: <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2017/05/TL-0021.pdf>. (accessed 15.05.2020).

15. Popuga, A. I. Osnovnye napravleniya umen'sheniya shuma vozdushnykh sudov. [The main directions of aircraft noise reduction]. *Aviatsiynno-kosmichna tekhnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 9(126), pp. 20–25. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2015_9_5 (accessed 16.05.2020).

16. Munin, A. G. *Aviacionnaya akustika* [Aviation acoustics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, vol. 1. 243 p.

17. Smith, M. J. T. *Aircraft noise*. Cambridge, Cambridge University Press, 1989. 359 p.

18. Samohin, V. G. *Shum GTD. Vvedenie v aviacionnuju akustiku* [GTE noise. Introduction to Aviation Acoustics]. Moscow, MAI Publ., 2007. 152 p.

19. Bertsch, L., Simons, D. G., Snell, M. *Aircraft Noise: The major sources, modelling capabilities, and reduction possibilities*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274587628_Aircraft_Noise_The_major_sources_modelling_capabilities_and_reduction_possibilities. DOI: 10.34912/acn0is3. (accessed 17.05.2020).

20. Mihajlova, A. B., Ahmedzjanov, D. A., Mihajlov, A. E., Nigmatulin, R. R. *Razvitie metodov i sredstv avtomatizirovannogo konceptual'nogo proektirovaniya aviacionnykh gazoturbinnnykh dvigatelej i nazemnykh gazoturbinnnykh jenergeticheskikh ustanovok* [Development of methods and means of computer-aided conceptual design of aircraft gas turbine engines and ground gas turbine power plants]. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 3 (56), pp. 69–78. Available at: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1549> (accessed 17.05.2020).

21. Doc 9501. *Environmental Technical Manual on the use of Procedures in the Noise Certification of Aircraft. Second edition*. Montreal, International civil aviation organization Publ., 2015, 296 p. (in Russian)

22. Jalovenko, E. V., Zhuravljov, V. N. *Zvukopogloshhajushhaja panel' gazoturbinnogo dvigatelja na baze irratsional'nogo chisla Fibonachchi* [Sound-absorbing panel of a gas turbine engine based on an irrational Fibonacci number]. *Aviatsiynno-kosmichna tekhnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 2016, no. 8 (135), pp. 55–60.

23. Vodop'jan, E. A., Sereda, T. N., Rjabkov, V. I. *Analiz metodov snizhenija aviacionnogo shuma v istochnike i na mestnosti* [Analysis of methods for reducing aircraft noise in the source and on the ground]. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye*

tehnologii, 2019, no. 84, pp. 144–156. DOI: 10.32620/oikit.2019.84.07.

24. Munin, A. G., Kvitka, V. E. *Aviacionnaja akustika* [Aviation acoustics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 448 p.

25. Munin, A. G., Kuznecov, V. M., Leont'ev, E. A. *Ajerodinamicheskie istochniki shuma* [Aerodynamic noise sources]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 248 p.

26. Postnov, V. I., Vjakin, V. N., Veshkin, E. A. *Issledovanija optimizacii vybora zvukopogloshhajushih konstrukcij* [Studies of the optimization of the choice of sound-absorbing structures]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*, 2011, no. 3 (27), pp. 55–64.

27. Baklanov, V. S., Postnov, S. S., Postnova, E. A. *Raschjot rezonansnykh zvukopo-gloshhajushhih konstrukcij dlja sovremennykh aviacionnykh dvigatelej* [Calculation of resonant sound-absorbing structures for modern aircraft engines]. *Matematicheskoe modelirovanie*, vol. 19, no. 8, pp. 22–30.

28. Anoshkin, A. N., Zaharov, A. G., Gorodkova, N. A., Chursin, V. A. *Raschjotno jeksperimental'nye issledovanija rezonansnykh mnogoslojnykh zvukopogloshhajushhih konstrukcij* [Computationally experimental studies of resonant multilayer sound-absorbing structures]. *Vestnik PNIPU. Mehanika*, 2015, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.01.

29. Pjatkina, S. A., Tjurin, A. P., Parahin, D. V., Sevast'janov, B. V., Savel'ev, A. P., Bajazitov, V. S., Vekshin, D. A. *Shumozashhitnaja panel'* [Soundproof panel]. Patent RF, no. 2478762, 2013.

30. Krivonos, V. V., Zhelezina, G. F., Guljaev, I. N., Solov'eva, N. A., Sidorova, V. V., Fadeeva, V. M., Egorova, N. A., Haliulin, V. I., Dvoeglazov, I. V., Menjashkin, D. G. *Zvukopogloshhajushhaja panel'* [Sound absorbing panel]. Patent RF, no. 2307216, 2007.

31. Shul'deshov, E. M., Kraev, I. D., Petrova, A. P. *Polimernyj zvukopogloshhajushhij material konstrukcija dlja snizhenija shuma na mestnosti aviacionnykh dvigatelej* [Sound absorbing polymer construction to reduce noise in the area of aircraft engines]. *Trudy VIAM*, 2018, no. 2 (62), pp. 47–52. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-6-6.

32. Farafonov, D. P., Migunov, V. P., Degovec, M. L., Aljoshina, R. Sh. *Poristovoloknistyj metallicheskij material dlja zvukopogloshhajushhih konstrukcij aviacionnykh dvigatelej* [Porous fibrous metal material for sound-absorbing structures of aircraft engines]. *Trudy VIAM*, 2016, no. 4 (40), pp. 3–12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-1-1.

33. Kuznecov, V. M. *Problemy snizhenija shuma passazhirskih samoljotov* [The problems of noise reduction in passenger aircraft]. *Akusticheskij zhurnal*, 2003, vol. 49, no. 3, pp. 293–317.

34. Baklanov, V. S. *Vibroakustika samoljotov novogo pokolenija s dvigateljami bol'shoj i sverh-bol'shoj stepeni dvuhkonturnosti* [Vibroacoustics of a new generation of aircraft with engines of high and ultra-high

bypass ratio]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 7, pp. 27–38.

35. Sugimoto, R., Murray, P., Astley, R. J. *Folded Cavity Liners for Turbo-fan Engine Intakes*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/268582852>. DOI: 10.2514/6.2012-2291. (accessed 20.05.2020).

36. 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 21.05.2020).

Поступила в редакцию 25.05.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. А. Рымаренко

Приведен обзор современных международных требований по авиационному шуму. Показано, что международные требования к уровням шума самолетов постоянно ужесточаются. Стремительный рост международного авиапарка приводит к увеличению количества взлетов и посадок самолетов в аэропортах, и как следствие проблема авиационного шума остается актуальной. Для снижения уровней шума в аэропортах применяются различные методы, одним из которых является эксплуатационные ограничения самолетов относительно уровней создаваемого ими шума. В странах Европейского союза действуют эксплуатационные ограничения для самолетов, отвечающих требованиям главы 3 с запасом по шуму менее 10 EPNдБ. Для уже созданных самолетов, прошедших сертификацию, вновь необходимо искать методы снижения шума. Основным типом самолета, эксплуатируемым в мире, является самолет с турбореактивными двухконтурными двигателями. Для такого самолета основными источниками шума при взлете являются шум вентилятора и реактивной струи, а при посадке – шум шасси, закрылков, предкрылков и шум вентилятора. При выборе способа снижения авиационного шума следует определить источник, который больше всего влияет на общий уровень шума. Было определено, что шум вентилятора является одним из основных источников шума. Для снижения уровня шума, который создает вентилятор, широко применяются звукопоглощающие конструкции (ЗПК), их применение является одним из наиболее приоритетных направлений снижения шума вентилятора. Рассмотрены достижения в применении ЗПК для борьбы с шумом отечественных самолетов Ан-124-100, Ан-148-100. Отмечено, что в связи с ростом требований к авиационному шуму необходимо применение новых ЗПК с улучшенными звукопоглощающими свойствами. Определено, что улучшить звукопоглощающие свойства ЗПК возможно благодаря расширению частотного диапазона звукопоглощения таких конструкций. Приведены современные методы улучшения акустических свойств ЗПК: использование многослойных резонансных ЗПК дает возможность настройки конструкции за счёт возросшего количества параметров расчета; применение модифицированных вариантов наполнителя ЗПК таких как гофрированные наполнители, перфорированные наполнители увеличенного размера; использование пористых и пористоволокнистых материалов в конструкции ЗПК для обеспечения дополнительной звукопоглощающей способности: использование низкочастотных ЗПК для снижения шума перспективных двигателей с высокой степенью двухконтурности.

Ключевые слова: авиационный шум; эксплуатационные ограничения по уровню шума, газотурбинный двигатель; турбореактивный двухконтурный двигатель; шум вентилятора; звукопоглощающие конструкции; наполнитель звукопоглощающей конструкции; многослойные звукопоглощающие конструкции; пористый материал; низкочастотные звукопоглощающие конструкции.

CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF THE DEVELOPMENT OF ACOUSTIC LINERS FOR GAS-TURBINE ENGINES

Y. Rymarenko

A review of current international aviation noise requirements is provided. It is shown that international requirements for aircraft noise levels are constantly increasing. The rapid growth of the international fleet leads to an increase in the number of take-offs and landings of aircraft at airports, and as a result, the problem of aircraft noise still relevant. To reduce noise levels at airports, various methods are used, one of which is the operational limitations of aircraft concerning the levels of noise they create. In European Union countries there are operational restrictions for aircraft meeting the requirements of Chapter 3 with a noise margin of less than 10 EPNдБ. For already established aircraft that have passed certification, again it is necessary to look for methods to reduce noise. The main type of aircraft in operation in the world is an aircraft with turbofan engines. For such an aircraft, the main sources of noise during take-off will be the noise of the fan and jet, while landing, the noise of the landing gear, flaps, slats, and

fan noise. When choosing a method of reducing aircraft noise, it should determine the source that most affects the overall noise level. It has been determined that fan noise is one of the main sources of noise. Acoustic liners constructions are widely used to reduce the noise level created by the fan. They are one of the most priority areas for reducing fan noise. Achievements in the use of acoustic liners to decrease the noise of domestic aircraft An-124-100, An-148-100 are considered. It is noted that due to the increasing requirements for aircraft noise, it is necessary to use new acoustic liners with improved sound-absorbing properties. It was determined that it is possible to improve the sound-absorbing properties of the acoustic liners by expanding the frequency range of sound absorption of such structures.

Modern methods for improving the acoustic properties of the acoustic liners are presented: the use of multi-layer resonant acoustic liners makes it possible to customize the design for an increased number of calculation parameters; the use of modified variants of the acoustic liners core such as corrugated core, oversized perforated core; the use of porous and porous fiber materials in the design of the acoustic liners to provide additional sound-absorbing ability, the use of low-frequency acoustic liners to reduce the noise of promising turbofan engines with a high and ultra-high bypass ratio.

Keywords: aircraft noise; noise-related operating restrictions; gas turbine engine; turbofan engine; fan noise acoustic liners; liner core; multilayer liners; porous material; low-frequency liners.

Римаренко Євген Олександрович – провідний інженер-конструктор відділу вібрації та акустики ДП "АНТОНОВ", Київ, Україна.

Yevhen Rymarenko – lead design engineer of vibration and acoustic department of ANTONOV COMPANY, Kyiv, Ukraine,
e-mail: acoustic.noise.civilian@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-1789-9529.