

УДК 629.7.035.(045)

- Усенко В. Ю.** начальник відділу силових установок, ДП «Антонов», Київ, Україна, e-mail: uvy1758@gmail.com;
- Дорошенко К. В.** д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: Kiki_ua@ukr.net;
- Мітрахович М. М.** д-р техн. наук, професор, заст. директора, ДП «Івченко – Прогрес», Запоріжжя, Україна, e-mail: mmm777@gmail.com

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СПІВВІСНОГО ГВИНТОВЕНТИЛЯТОРА НА АКУСТИЧНУ ЕМІСІЮ

Турбогвинтовентиляторні двигуни мають високу економічність при дозвукових швидкостях польоту, однак одна із актуальних проблем цих двигунів – високий рівень шуму співвісного гвинтовентилятора. Багатьма дослідниками було доведено, що параметри однорядних гвинтів мають суттєвий вплив на акустичну емісію. Показано, що змінюючи форму лопатей, діаметр, частоту обертання, кількість лопатей можна забезпечити зменшення акустичної емісії однорядних гвинтів. Однак для співвісних гвинтовентиляторів ці питання залишаються до кінця не дослідженими. Метою роботи є оцінка впливу кількості лопатей на акустичну емісію співвісного гвинтовентилятора. У роботі проведено дослідження зміни рівня акустичного тиску чотирьох модифікованих гвинтовентиляторів. Потужність гвинтовентиляторів є незмінною. Кількість лопатей першого ряду гвинтовентилятора збільшено від 8 до 10...12, другого – від 6 до 8...12. Частоту обертання зменшено на 7,17...12,5%, відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора зменшено до 0,987...0,942. Дослідження виконано за допомогою чисельного експерименту. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась модель турбулентності SST Gamma Theta Transitional. Розрахункова структурована гексаедральна сітка з адаптацією пограничного шару складалась з 20 млн. комірок. Газодинамічний розрахунок течії показав, збільшення кількості лопатей першого ряду з 8 до 12 приводить до зменшення рівня нерівномірності потоку на вході в другий ряд гвинтовентилятора, що позитивно впливає на аеродинамічні джерела утворення шуму. Отримані результати свідчать, що розрахований модифікований варіант співвісного гвинтовентилятора, що має 12 лопатей першого ряду та 12 лопатей другого ряду, частоту обертання 743,76 об/хв., відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора 0,942 дозволяє покращити акустичні характеристики гвинтовентилятора в джерелі на 4 дБ відносно базового варіанту, що в свою чергу впливає на шум силової установки і літака. При цьому тягові характеристики гвинтовентилятора залишаються незмінними.

Ключові слова: акустична емісія, рівень акустичного тиску, співвісний гвинтовентилятор, лопать, частота обертання, діаметр, чисельний експеримент.

Вступ

Турбогвинтовентиляторні двигуни мають високу економічність при дозвукових швидкостях польоту, однак одна із актуальних проблем цих двигунів - високий рівень шуму співвісного гвинтовентилятора.

Шум співвісного гвинтовентилятора має складну структуру. На фоні періодичного силового впливу лопатей гвинтовентилятора на навколишнє середовище (шум обертання) з лопатей гвинтовентилятора за всією довжиною відбувається зрив потоку. За рядами лопатей гвинтовентилятора утворюються вихрові аеродинамічні сліди, що є джерелом

вихрового шуму. Крім цього, вихрова завеса за першим рядом гвинтовентилятора є вхідною турбулентністю в другий ряд гвинтовентилятора. В даному випадку можна виділити окрему складову – шум взаємодії першого і другого рядів гвинтовентилятора. Акустична емісія носить нестационарний і періодичний характер [1].

У роботі [2] показано, що навіть для однорядного гвинта хвилеподібна вихідна кромка дозволяє знизити рівень шуму гвинта. Дослідження [3] показали можливість зниження дискретних компонент відповідним вибором відношення кількості лопатей однорядного гвинта. У роботі [4] показано, що

при збільшенні кількості лопатей однорядного гвинта від 3 до 8 в діапазоні чисел Маху від 0,4 до 1 рівень звукового тиску зменшується на 4020 дБ. У роботах [4, 5, 6] показано, що зменшення діаметру другого ряду гвинта дає можливість знизити рівень шуму, однак в роботі розглядався модельний гвинтовентилятор. У роботі [6] зазначається, що для забезпечення необхідної сили тяги при зменшенні діаметру лопатей їх кількість необхідно збільшувати.

Багатьма дослідниками було доведено, що параметри однорядних гвинтів мають суттєвий вплив на акустичну емісію. Так, у роботах [2-6] показано, що змінюючи форму лопатей, діаметр, частоту обертання, кількість лопатей можливо забезпечити зменшення акустичної емісії однорядних гвинтів. Однак для співвісних гвинтовентиляторів ці питання залишаються до кінця не дослідженими.

Метою роботи є оцінка впливу кількості лопатей на акустичну емісію співвісного гвинтовентилятора.

1. Постановка задачі

Базовий варіант співвісного гвинтовентилятора має 8 лопатей першого ряду і 6 лопатей другого ряду, частоту обертання – 850 об/хв, кінцевий діаметр лопатей першого і другого ряду дорівнює 4500 мм.

Проведено попередні теоретичні розрахунки щодо зміни параметрів співвісного гвинтовентилятора при збільшенні лопатей першого ряду з 8 до 12 і другого з 6 до 12 при умові $N_1 = \text{const}$, $N_2 = \text{const}$ і $N = \text{const}$.

Рівняння для визначення потужності першого ряду гвинтовентилятора записується наступним чином [7]:

$$N_1 = \bar{\beta}_{1z_1} \cdot \rho_1 \cdot n_1^3 \cdot D_1^5,$$

де $\bar{\beta}_{1z_1}$ – сумарний коефіцієнт потужності першого ряду співвісного гвинтовентилятора,

z_1 – кількість лопатей першого ряду гвинтовентилятора,

ρ_1 – густина повітря,

n_1 – частота обертання першого ряду співвісного гвинтовентилятора,

D_1 – периферійний діаметр першого ряду співвісного гвинтовентилятора.

Рівняння для визначення потужності другого ряду гвинтовентилятора записується наступним чином [7]:

$$N_2 = \bar{\beta}_{2z_2} \cdot \rho_2 \cdot n_2^3 \cdot D_2^5,$$

де $\bar{\beta}_{2z_2}$ – сумарний коефіцієнт потужності другого ряду співвісного гвинтовентилятора,

z_2 – кількість лопатей другого ряду гвинтовентилятора, ρ_2 – густина повітря, n_2 – частота обертання другого ряду співвісного гвинтовентилятора, D_2 – периферійний діаметр другого ряду співвісного гвинтовентилятора.

Задаючи значення z_1 і z_2 при умові $N_1 = \text{const}$, $N_2 = \text{const}$ і $N = \text{const}$, були отримані 4 модифікованих варіанти співвісних гвинтовентиляторів (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри модифікованих гвинтовентиляторів

Номер варіанту	№1	№2	№3	№4
Параметр				
$n_1 = n_2$, об/хв	789,072	789,072	743,76	743,76
z_1 , шт.	10	10	12	12
z_2 , шт.	8	10	10	12
$\bar{D} = D_2/D_1$	0,987	0,942	0,987	0,942

Розрахунок течії виконувався за допомогою осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що замикалися моделлю турбулентності SST Gamma Theta Transitional [8]. Рішення диференціальних рівнянь, що описують газодинамічні процеси методом кінцевих об'ємів, вимагає розбиття розрахункового об'єму на елементарні елементи. Пошук рішення відбувається в певних точках об'єму - вузлах. Сукупність вузлів утворює розрахункову сітку. Вся досліджувана область співвісного гвинтовентилятора з метою забезпечення коректного моделювання обтікання першого і другого ряду гвинтовентилятора і необхідністю врахувати вплив повітрозбірника двигуна на параметри за гвинтовентилятором, була розподілена на чотири під області:

- зовнішня;
- канал повітрозбірника;
- перший ряд гвинтовентилятора;
- другий ряд гвинтовентилятора.

У всіх чотирьох підобластях була побудована структурована гексадральна сітка з адаптацією пограничного шару ≈ 20 млн. комірок.

На рис. 1 зображено фрагменти побудованої розрахункової сітки.

У місцях розрахункової області, в яких передбачається виникнення сильних градієнтів обчислюваних змінних, розрахункова сітка повинна мати відповідне згущення для отримання адекватного рішення. До таких місць відносяться області, в яких має місце суттєвий пограничний шар. При створенні сітки для всіх чотирьох підобластей початкова висота комірок

у стінки складала 0,01 мм. Значення безрозмірної координати першого пристінного вузла y^+ не перевищувало 1,0.

Для моделювання течії обрано розрахункову схему другого порядку з локальним використанням розрахункової схеми першого порядку.

Згідно з отриманими параметрами співвісного гвинтовентилятора було побудовано твердотільні 3D моделі з розроблених модифікованих співвісних гвинтовентиляторів (рис. 2).

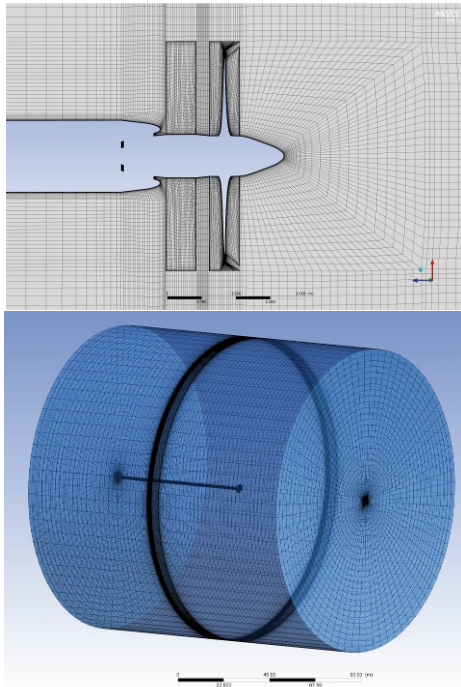


Рис. 1. Фрагменти побудованої розрахункової сітки

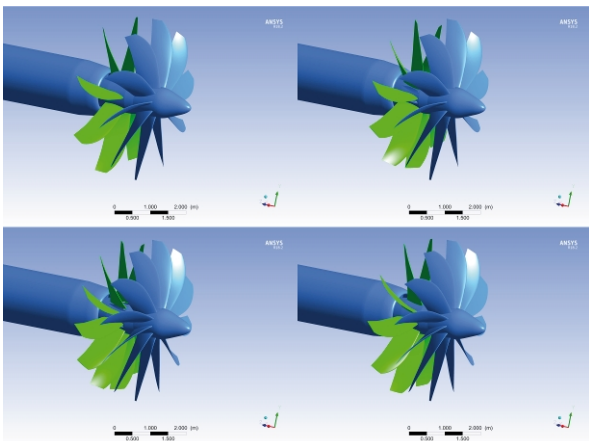


Рис. 2. 3D Моделі розроблених модифікованих співвісних гвинтовентиляторів

Рівень акустичного тиску розраховувався за формулою [4]:

$$L = 20 \lg(P/P_0),$$

де P – звуковий тиск, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – величина порогового звукового тиску.

2. Дослідження впливу параметрів співвісного гвинтовентилятора на акустичну емісію

За результатами газодинамічних розрахунків було отримано рівень акустичного тиску досліджуваних модифікованих співвісних гвинтовентиляторів.

Проаналізуємо як змінювався рівень акустичного тиску окремо в першому і другому ряді співвісного гвинтовентилятора.

На рис.3 представлено залежність зміни рівня акустичного тиску ΔL першого ряду співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту від кількості лопатей першого ряду для всіх досліджуваних модифікованих гвинтовентиляторів.

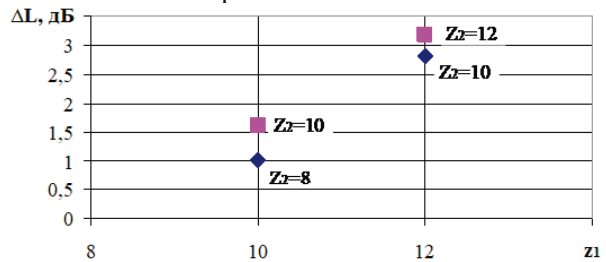


Рис. 3. Залежність зміни рівня акустичного тиску ΔL першого ряду співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту від кількості лопатей першого ряду

Аналіз отриманих результатів показує, що при збільшенні кількості лопатей першого ряду від 8 до 12 рівень акустичного тиску зменшується на від 1 до 3,2 дБ. Найкращий ефект спостерігається для модифікації гвинтовентилятора при максимальній кількості лопатей $z_1 = 12$. Враховуючи, що в модифікованих варіантах гвинтовентиляторів частоту обертання зменшено в порівнянні з базовим варіантом, то ефект від зміни рівня шуму також пов'язано зі зміною частоти обертання. Однак результати отримані для однакової частоти показують, що при збільшеній кількості лопаток є тенденція зменшення шуму.

На рис. 4 представлено залежність зміни рівня акустичного тиску ΔL другого ряду співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту від кількості лопатей другого ряду для всіх досліджуваних модифікованих гвинтовентиляторів.

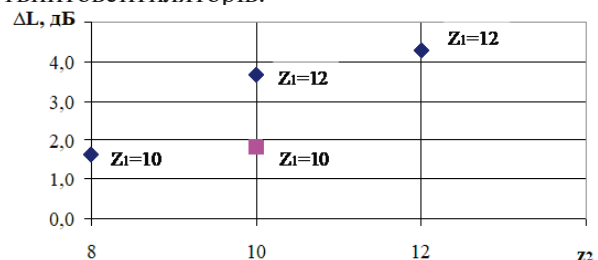


Рис. 4. Залежність зміни рівня акустичного тиску ΔL другого ряду співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту від кількості лопатей другого ряду

При збільшенні кількості лопатей другого ряду співвісного гвинтовентилятора від 6 до 12 відбувається зниження рівня акустичного тиску від 1,7 до 4,3 дБ. Частково це пов'язано зі зменшенням частоти обертання з 850 об/хв до 789,072...743,76 об/хв., а також зі зменшенням відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора $\bar{D}=0,987...0,942$. При застосуванні максимальної кількості лопатей $z_2 = 12$ має місце найбільший ефект зниження акустичної емісії. Цікаво, що при однаковій кількості лопатей другого ряду $z_2 = 10$, але при різній частоті обертання і різних співвідношеннях діаметру, кращі показники має варіант, у якого частота обертання найменша, незважаючи на те, що співвідношення діаметру більше $\bar{D} = 0,987$, але також треба брати до уваги, що кількість лопатей першого ряду різна (10 і 12). Слід відмітити, що при збільшеній кількості лопатей першого ряду гвинтовентилятора $z_1 = 12$ відбувається зміна обтікання на вході в другий ряд гвинта, що позитивно впливає на шум взаємодії першого і другого ряду співвісного гвинтовентилятора.

На рис. 5 представлено зміну рівня акустичного тиску ΔL співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту для всіх досліджуваних модифікованих гвинтовентиляторів.

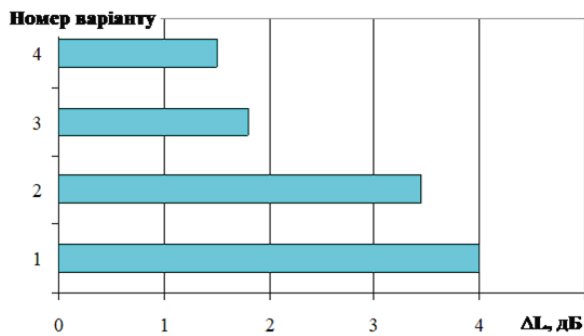


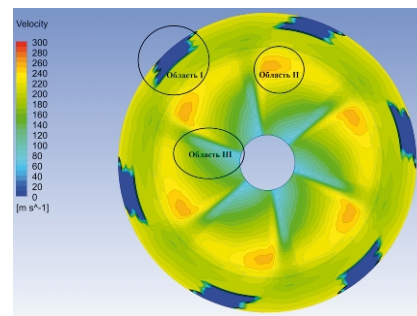
Рис. 5. Зміна рівня акустичного тиску ΔL співвісного гвинтовентилятора відносно базового варіанту для всіх досліджуваних модифікованих гвинтовентиляторів

Представлені результати показують, що збільшення лопатей першого ряду з 8 до 12 і збільшення лопатей другого ряду з 6 до 12, зменшення частоти обертання з 850 об/хв до 789,072...743,76 об/хв., зменшення відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора $\bar{D} = 0,987...0,942$ приводить до зменшення рівня акустичного тиску на 1,54 дБ. Серед досліджуваних варіантів найбільш ефективним з точки зору зниження акустичної емісії в джерелі є варіант

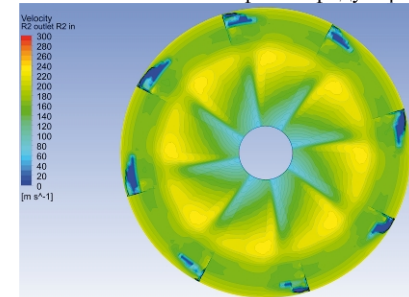
№4 (зменшення рівня акустичного тиску на 4 дБ), що має частоту обертання $n_1 = n_2 = 743,76$ об/хв., кількість лопатей першого ряду $z_1 = 12$, кількість лопатей другого ряду $z_2 = 12$, відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора $\bar{D} = 0,942$.

Результати попередніх досліджень показали, що рівень звукового тиску, що генерує другий ряд співвісного гвинтовентилятора вище, ніж рівень звукового тиску першого ряду гвинта. Одна з причин цього явища є колова та радіальна нерівномірність на вході у другий ряд гвинта, яку створює аеродинамічний слід за першим рядом гвинта [8].

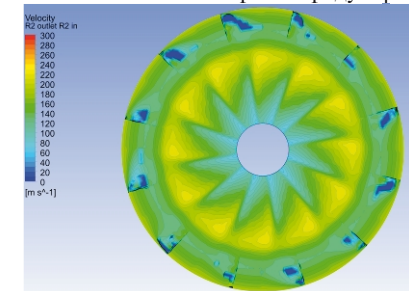
Проаналізуємо, як якісно змінився рівень нерівномірності потоку за першим рядом вентилятора на вході у другий ряд гвинтовентилятора. На рис. 6 представлено розподілення поля швидкості на вході у другий ряд гвинтовентилятора для всіх досліджуваних модифікованих варіантів гвинтовентилятора.



а - кількість лопатей першого ряду $z_1 = 8$



б - кількість лопатей першого ряду $z_1 = 10$



в - кількість лопатей першого ряду $z_1 = 12$

Рис. 6. Розподілення поля швидкості на вході у другий ряд гвинтовентилятора

Аналіз візуалізації полів швидкості базового варіанту гвинтовентилятора з кількістю лопатей першого ряду $z_1 = 8$ (рис.6, а) показує, що на вході у другий ряд гвинтовентилятора для кожної лопаті присутні три характерні області нерівномірності потоку: область I – зона нульових швидкостей над лопаттю гвинтовентилятора, область II – зона підвищених швидкостей у периферійній частині лопаті, область III – зона понижених швидкостей у привтулковій частині лопаті. Збільшення кількості лопатей призвело до перерозподілу поля швидкості на вході у другий ряд гвинтовентилятора.

При збільшенні кількості лопатей першого ряду до $z_1 = 10$ область нульових швидкостей над лопаттю суттєво зменшується, в області підвищених частот швидкість зменшується до 230-240 м/с, область понижених швидкостей біля втулки лопаті залишається майже незмінною.

При збільшенні кількості лопатей першого ряду до $z_1 = 12$ область нульових швидкостей над лопаттю зменшується в порівнянні з варіантом гвинтовентилятора з $z_1 = 10$. В області II відбувається вирівнювання швидкостей і швидкість зменшується від 250 м/с для $\bar{p} = 1$ до 210...200 м/с. Область III в якісному відношенні майже не змінюється.

Таким чином, збільшення кількості лопатей першого ряду з 8 до 12 приводить до зменшення рівня нерівномірності потоку на вході в другий ряд гвинтовентилятора, що позитивно впливає на аеродинамічні джерела утворення шуму.

Можна зробити висновок, що розроблений модифікований варіант співвісного гвинтовентилятора, який має 12 лопатей першого ряду, 12 лопатей другого ряду, частоту обертання

$n_1 = n_2 = 743,76$ об/хв., відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора $\bar{D} = 0,942$ дозволяє покращити акустичні характеристики гвинтовентилятора в джерелі на 4 дБ, що в свою чергу впливає на шум силової установки і літака. При цьому тягові характеристики гвинтовентилятора залишаються незмінними.

Висновок

В роботі представлено результати дослідження акустичної емісії співвісних гвинтовентиляторів при збільшенні кількості лопатей першого і другого ряду. Отримані результати свідчать, що розрахований модифікований варіант співвісного

гвинтовентилятора, який має 12 лопатей першого ряду, 12 лопатей другого ряду, частоту обертання

$n_1 = n_2 = 743,76$ об/хв., відношення діаметрів другого і першого рядів співвісного гвинтовентилятора $\bar{D} = 0,942$ дозволяє покращити акустичні характеристики гвинтовентилятора в джерелі на 4 дБ відносно базового варіанту, що в свою чергу впливає на шум силової установки і літака. При цьому тягові характеристики гвинтовентилятора залишаються незмінними.

Література

1. Мунин А. Г. Авиационная акустика [Текст] / А. Г. Мунин, В. Е. Квитка. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
2. Butt F. R. Numerical Investigation of the Effect of Leading-Edge Tubercles on Propeller Performance [Електронний ресурс] / F.R. Butt, T. Talha // Journal of Aircraft. DOI: 10.2514/1.C0348. Режим доступу до журналу: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/1.C034845>
3. Акустико-аэродинамические исследования [Текст] ; под ред. д.ф.-м.н. А. В. Римского-Корсакова. – М.: Наука, 1975. – 102 с.
4. Мошков П. А. Оценка влияния числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта [Текст] / П. А. Мошков, В. Ф. Самохин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 3. – С. 25-34. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34.
5. Janardan B. A. [Acoustic characteristics of counterrotating unducted fans from model scale tests](#) / B. A. Janardan, P. R. Glibe // Journal of Aircraft. – 1990. – Vol. 27, no. 3. – P. 268-275. DOI: 10.2514/3.45929
6. Lieser J. A. Aeroacoustic design of a 6-bladed propeller [Text] / J. A. Lieser, D. Lohmann, S. H. Rohardt // Aerospace Science and Technology. – 1997. – Vol. 1, no. 6. – P. 381-389. DOI: 10.1016/S1270-9638(97)90012-2
7. Інтеграція авіаційних силових установок і літальних апаратів [Текст] : підручник / Ю. М. Терещенко, М. С. Кулик, В. В. Панін та ін.; за ред. Ю. М. Терещенка. – К.: Вид-во Нац. авіа. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 344 с.
8. Усенко В. Ю. Вибір моделі турбулентної в'язкості для моделювання шуму гвинтовентилятора [Текст] / В. Ю. Усенко, М. М. Мітрахович, К. В. Дорошенко // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Сер: Технічні науки. – 2019. – Т. 30 (69), № 1. – С. 6-11.

Поступила в редакцію 28.05.2019

В. Ю. Усенко, Е. В. Дорошенко, М. М. Митрахович. Влияние параметров соосного винтовентилятора на акустическую эмиссию

Турбовинтовентиляторные двигатели имеют высокую экономичность при дозвуковых скоростях полета, однако одна из актуальных проблем этих двигателей – высокий уровень шума соосного винтовентилятора. Многими исследователями было доказано, что параметры однорядных винтов имеют существенное влияние на акустическую эмиссию. Показано, что изменяя форму лопастей, диаметр, частоту вращения, количество лопастей можно обеспечить уменьшение акустической эмиссии однорядных винтов. Однако для соосных винтовентиляторов эти вопросы остаются до конца не исследованы. Целью работы является оценка влияния количества лопастей на акустическую эмиссию соосного гвинтовентилятора. В работе проводится исследование изменения уровня акустического давления четырех модифицированных винтовентиляторов. Мощность винтовентиляторов остается неизменной. Количество лопастей первого ряда винтовентилятора увеличено от 8 до 10...12, второго - от 6 до 8...12. Частота вращения уменьшилась на 7,17...12,5%, отношение диаметров второго и первого рядов соосного винтовентилятора уменьшено до 0,987...0,942. Исследование выполнено с помощью численного эксперимента. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса использовалась модель турбулентности SST Gamma Theta Transitional. Расчетная структурированная гексаэдральная сетка с адаптацией пограничного слоя состояла из 20 млн. ячеек. Газодинамический расчет течения показал, что увеличение количества лопастей первого ряда с 8 до 12 приводит к уменьшению уровня неравномерности потока на входе во второй ряд винтовентилятора, что положительно влияет на аэродинамические источники образования шума. Полученные результаты свидетельствуют, что использование рассчитанного модифицированного варианта соосного винтовентилятора, который имеет 12 лопастей первого ряда и 12 лопастей второго ряда, частоту вращения 743,76 об/мин., отношение диаметров второго и первого рядов соосного гвинтовентилятора 0,942 позволяет улучшить акустические характеристики винтовентилятора в источнике на 4 дБ относительно базового варианта, что в свою очередь влияет на шум силовой установки и самолета. При этом тяговые характеристики винтовентилятора остаются неизменными.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, уровень акустического давления, соосный винтовентилятор, лопасть, частота вращения, диаметр, численный эксперимент.

V.Y. Usenko, E.V. Doroshenko, M.M. Mitrahovich. Effect of coaxial propfan parameters on acoustic emission

Turbopropfan engines (TPFE) has high profitability at subsonic flight speed. However, one of the issues for these engine is high noise level of coaxial propfan. Many researchers have proven that single-row propeller parameters has significant influence on acoustic emission. It has been shown, that it is possible to decrease acoustic emission of single-row propellers due to changing of blade shape, diameter, rotational speed, and number of blades. Meanwhile, current questions are not completely investigated for coaxial propfans. The purpose of work is impact assessment of number of blades on coaxial propfan acoustic emission. In the research the changing of acoustic pressure of four modified propfans is addressed. The power of propfans remains constant. The base propfan has 8 blades in the first row and 6 blades in the second row. The number of blades in the first row is increased from 8 to 10...12, and in the second row number of blades is increased from 6 to 8...12. PRM is decreased for 7.17...12.5%. The first and the second row diameter ration of coaxial propfan is decreased to 0.987...0.942. The research was conducted with a help of numerical experiment method. For the closure of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations the SST Gamma Theta Transitional turbulence model was used. Calculated structured hexahedral mesh adaptation of the boundary layer consisted of 20 million cells. The value of the dimensionless wall distance (y^+) did not exceed 1.0. Gas dynamic flow calculation has shown that increasing of the first row number of blades from 8 to 12 leads to a decrease in flow irregularity at the propfan second row entrance, which is a positive effect on the aerodynamic source of noise. The received results shows that use of calculated modified variant of coaxial propfan (with 12 blades in the first row and 12 blades in the second row, rotational speed is 743.76, the coaxial propfan diameter ratio of the first and the second row is 0.942) allows to improve the propfan acoustic characteristics at the source by 4dB relative to the base variant, which in turn affects the noise of aircraft powerplant. At the same time, thrust characteristics of the propfan remains the same.

Keywords: acoustic emission, acoustic pressure level, coaxial propfan, blade, rotation frequency, diameter, numerical experiment.

References

1. Munin A. G., Kvitka V. E. Aviacionnaja akustika [Aviation acoustics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 448 p.
2. But F. R., Talha T. Numerical Investigation of the Effect of Leading-Edge Tubercles on Propeller Performance. *Journal of Aircraft*. DOI: 10.2514/1.C0348. <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/1.C034845>
3. Rimskij-Korsakov A. V. Akustiko-ajerodinamicheskie issledovanija [Acoustic aerodynamic research]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 102 p.
4. Moshkov P. A., Samohin V. F. Ocenka vlijanija chisla lopastej i diametra na shum vozdušnogo vinta [Evaluation of the influence of the number of blades and diameter of the propeller noise]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie*. 2016, vol. 15, no. 3, pp. 25-34. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34.
5. Janardan B. A., Gliebe P. R. [Acoustic characteristics of counterrotating unducted fans from modelscale tests](#). *Journal of Aircraft*. 1990, vol. 27, no. 3, pp. 268-275. DOI: 10.2514/3.45929
6. Lieser J. A., Lohmann D., Rohardt C. H. Aeroacoustic design of a 6-bladed propeller. *Aerospace Science and Technology*. 1997, vol 1, no. 6, pp. 381–389. DOI:10.1016/S1270-9638-(97)90012-2
7. Tereshhenko Yu.M., Kulik M.S., Panin V.V. Īntegracija aviacijnih silovih ustanovok i lital'nih aparativ [Integration of aviation plants and airplanes]. Kiïv, Vid-vo Nac. avia.un-tu «NAU-druk», 2009. 344 p.
8. Usenko V.Yu., Mitrahovich M.M., Doroshenko K. V. Vibir modeli turbulentoj v'jazkosti dlja modeljuvannja shumu gvintoventiljatora [The selection of turbulent viscosity model for modelind propeller fan noise]. *Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Ī. Vernads'kogo. Ser. Tehnichni nauki [Scientists of the Taurida National University. V. I. Vernadsky. Sir: Technical Science]*, 2019, vol. 30 (69), no. 1, pp. 6-11.