

УДК 629.7.014-519.026.55:534.6

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.02

А. А. КОВТУН

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА БПЛА

**Предметом** дослідження є акустична характеристика гвинта безпілотного літального апарату. **Об'єктом** дослідження є гвинт безпілотного літального апарату. **Метою** роботи є оцінка впливу форми та кількості лопатей на зміну рівня акустичного тиску гвинта безпілотного літального апарату. Для досягнення мети були вирішені наступні **задачі**: моделювання течії в семи дволопатемих гвинтах з різною формою лопаті; моделювання течії в гвинті безпілотного літального апарату з 2-5 лопатями. Дослідження течії у гвинті проводилось **методом** чисельного експерименту. Акустичні характеристики розраховувались на основі аеродинамічних характеристик гвинта. Рівень акустичного тиску  $L$  оцінювався в ближньому акустичному полі для перших шести гармонік. **Результати**: Досліджено зміну рівня акустичного тиску для семи гвинтів безпілотних літальних апаратів при різних формах лопаті. Периферійний та втулковий діаметр, кути установки лопатей, режим роботи не змінювались для всіх досліджуваних варіантів гвинтів. Аналіз отриманої акустичної характеристики показав, що при незмінних кутах установки лопаті та режиму роботи, форма лопаті впливає на зміну рівня акустичного тиску. Гвинт з широкохордною формою лопаті має найгірші акустичні характеристики в дослідженому діапазоні частот обертання. Застосування шаблевидної форми лопаті не призвело до зменшення рівня акустичного тиску. Рівень акустичного тиску при частоті обертання гвинта з шаблевидною формою лопаті від 3000 до 11000 об/хв. такий же, як і рівень акустичного тиску гвинтів з формою лопаті №5, 6, 7. Отримані дані зміни рівня акустичного тиску гвинтів з різною кількістю лопатей показують, що кількість лопатей впливає на генерування акустичного випромінювання. При збільшенні лопатей від двох до п'яти рівень акустичного тиску збільшився на 0,8...3,5 дБ. **Наукова новизна та практична значимість** проведених досліджень полягає в тому, що отримані нові дані щодо впливу форми лопаті гвинта безпілотного літального апарату на рівень акустичного тиску в ближньому полі. Отримані дані допоможуть у створенні і оптимізації параметрів гвинтів безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова**: гвинт; форма лопаті; БПЛА; рівень акустичного тиску; моделювання течії; ближнє акустичне поле; частота обертання.

## Вступ

Можливості використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стрімко зростають. З подальшим розвитком акумуляторних технологій, зв'язку, навігації, спостереження та автономних систем загалом багато БПЛА працюватимуть на відносно малих висотах. Таким чином, проблема впливу шуму БПЛА на здоров'я та благополуччя людини стане більш актуальною. Випромінювання шуму стане суттєвою перешкодою для їх широкого впровадження. БПЛА генерують складне акустичне поле, яке до кінця не вивчене. Багато компонентів та їх взаємодія впливають на загальний рівень шуму та поведінку акустичного поля. Одним із основних джерел шуму БПЛА є повітряний гвинт [1].

Широке розповсюдження застосування БПЛА останніми роками сприяло стрімкому зростанню наукових досліджень, які пов'язані із акустичним випромінюванням гвинтів БПЛА.

Важливим аспектом дослідження акустичних характеристик повітряних гвинтів БПЛА є проведення експериментальних випробувань на стенді та в

польотних умовах, а також чисельний розрахунок акустичного випромінювання. Так, у роботах [2, 3] представлені результати експериментального аналізу аероакустичних характеристик гвинтів, призначених для приведення в рух невеликих БПЛА. На додаток до експериментальних досліджень представлено та проаналізовано чисельний аналіз акустичних характеристик. У роботі [2] автори використовують модель розрахунку акустичного випромінювання гвинтів, засновану на вирішенні рівняння Фокс Вільямса-Хоукінгса та моделі ширококутового шуму.

Зважаючи на те, що експериментальні дослідження шуму гвинтів не завжди є доступними, важливим також є розробка та апробація методик розрахунку акустичного випромінювання гвинтів малих БПЛА, заснованих на аналітичному розрахунку та моделюванні течії. У роботі [4] проаналізовано дослідження з моделювання течії навколо лопатей квадрокоптерів аеротаксі. та методи Розроблено та апробовано модель розрахунку акустичного поля, що створюється аеродинамічною взаємодією потоку та лопатей.

Проблемі зниження шуму малих БПЛА присвячено багато наукових досліджень, проте ця проблема до кінця не вирішена. Так, у роботі [5] досліджується вплив розташування гвинтів та планера на акустичне випромінювання БПЛА. Підняття гвинтів над корпусом БПЛА призвело до зниження шуму до 8 дБА у прямому польоті і лише до незначного зниження шуму під час висіння. У роботі [6] досліджується вплив частоти обертання, діаметра та кількості гвинтів на акустичне випромінювання. Всі конфігурації мають однакове навантаження на гвинт і кінцеве число Маха, при цьому радіус гвинта зменшується, а оберти збільшуються при переході від квадрокоптера до октокоптера. Результати моделювання показують, що ортогональне фазування між гвинтами призводить до значного зниження шуму (від 9 до 14 дБ порівняно з еквівалентним одиночним гвинтом). Подальше зменшення числа Маха на закінці не тільки зменшує шум, але й створює ще глибші області тиші. Дослідження частотних спектрів рівня звукового тиску показує, що менші гвинти, які швидко обертаються (від квадрокоптера до октокоптера) створюють більше тональних піків на більш високих частотах. У роботі [7] автори досліджували метод зниження шуму гвинта БПЛА за допомогою зміни форми лопаті. Форма лопаті гвинта відрізнялася від базової лопаті зсуванням усіх поперечних перерізів до задньої кромки. Показано, що аеродинамічні характеристики нового гвинта приблизно такі ж, як у базового по тязі і силовому навантаженню. Зниження тонального шуму в середньочастотному діапазоні спостерігається при високих значеннях обертів за хвилину, що відповідає тенденції спектрів тяги. Зниження широкосмугового шуму у високочастотному діапазоні спостерігається для всіх значень обертів. Зниження загального рівня звукового тиску гвинта з удосконаленими лопатями в порівнянні з базовим становить близько 1,4 - 2 дБ.

Отже, дослідження направлені на зменшення акустичного випромінювання гвинтами БПЛА є актуальними. Досягти покращення акустичних характеристик гвинтів можливо варіюючи такими параметрами як частота обертання, кількість гвинтів, форма лопаті, діаметральні розміри, розташування гвинтів відносно планера та відносно один одного. Однак, питання впливу кількості лопатей та форми лопатей на акустичне випромінювання гвинтів залишається не до кінця вирішеним.

Метою роботи є оцінка впливу форми та кількості лопатей на зміну рівня акустичного тиску гвинта БПЛА.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- моделювання течії в семи дволопатемих гвинтах з різною формою лопаті;

- моделювання течії в гвинті БПЛА з 2-5 лопатями.

### Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження обрано гвинт БПЛА. Периферійний діаметр гвинта – 128мм. В першій частині дослідження вивчались акустичні характеристики семи дволопатемих гвинтів з різною формою лопаті.

Тривимірні моделі досліджуваних дволопатемих гвинтів БПЛА показано на рис.1.

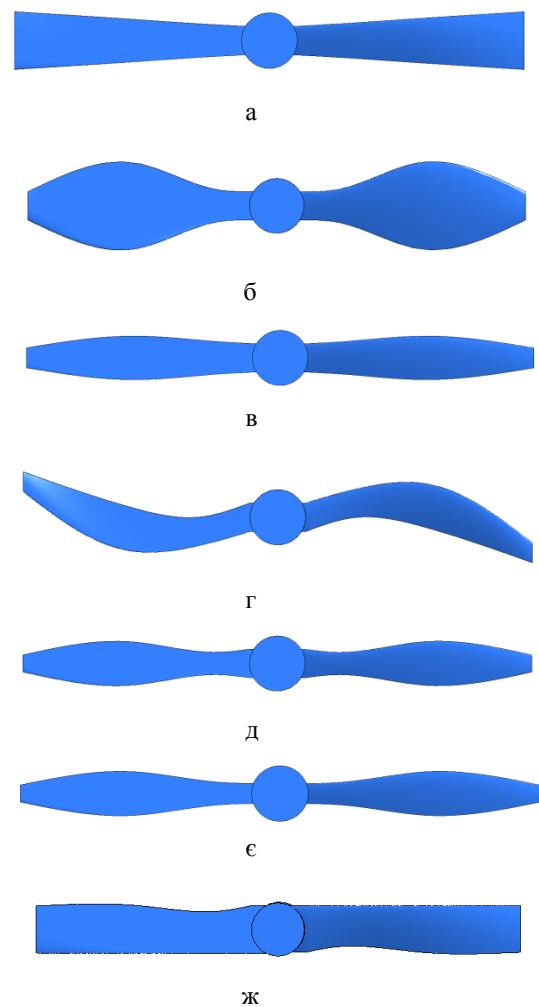


Рис.1. Моделі досліджуваних дволопатемих гвинтів: а – варіант гвинта №1; б – варіант гвинта №2; в – варіант гвинта №3; г – варіант гвинта №4; д – варіант гвинта №5; е – варіант гвинта №6; ж – варіант гвинта №7

У другій частині дослідження вивчались акустичні характеристики гвинтів з формою лопаті, зображеної на рис.1,а. Гвинти мали дві, три, чотири та п'ять лопатей. На рис.2 показано створені тривимірні моделі досліджуваних гвинтів БПЛА.

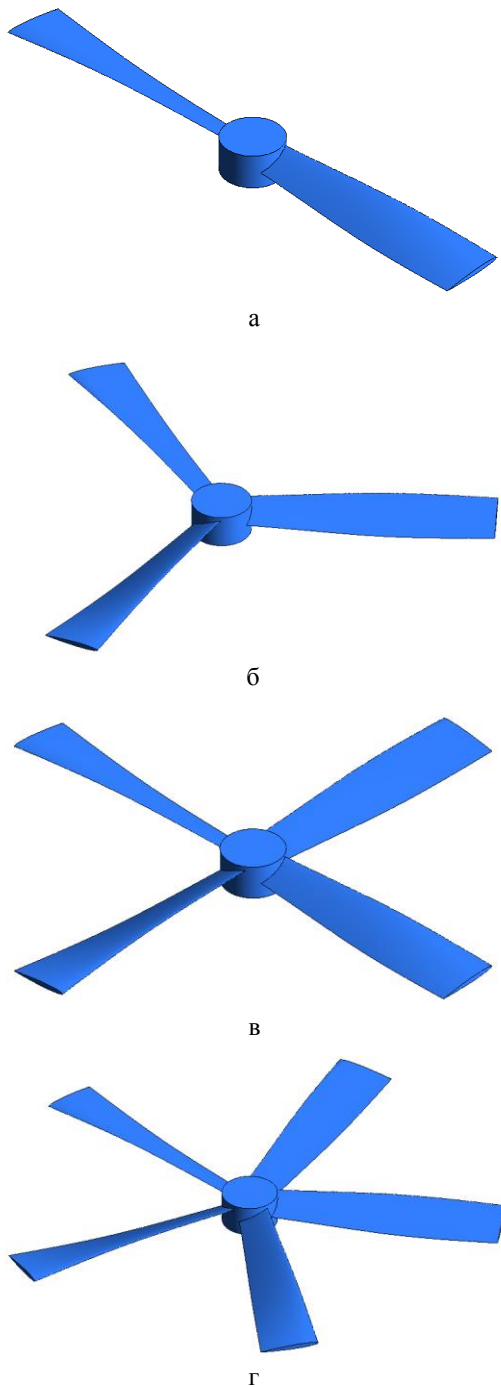


Рис. 2. Моделі досліджуваних гвинтів:

- а – гвинт з двома лопатями;
- б – гвинт з трьома лопатями;
- в – гвинт з чотирма лопатями;
- г – гвинт з п'ятьма лопатями

Розрахунок рівня акустичного тиску проводився для частоти обертання гвинта від  $n=3000$  до  $n=11000$  об/хв. на висоті  $H=0$  м при стандартних атмосферних умовах. Прийняте припущення при розрахунку: відсутність вітру.

Акустичні характеристики розраховувались на основі аеродинамічного розрахунку методом чисельного експерименту. Параметри обтікання дволопатевого гвинтів розраховувались за допомогою вирішення рівнянь системи Нав'є-Стокса, яка замикалась моделлю турбулентності SST.

## Результати та обговорення

Рівень акустичного тиску досліджуваних гвинтів БПЛА оцінювався за наступною формулою [8]:

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

де  $P$  – акустичний тиск, а  $P_0=2 \cdot 10^{-5}$  Па – пороговий тиск. Рівень акустичного тиску розраховувався для кожного варіанту розрахунку для перших шести гармонік в ближньому акустичному полі в радіусі 1 м.

Перша частина дослідження ставила за мету провести оцінку впливу форми лопаті на рівень акустичного тиску. Акустичні характеристики отримані на основі моделювання течії у гвинтах. На рис. 3 представлено отриману залежність рівня звукового тиску від частоти обертання для семи гвинтів з різними формами лопатей.

Аналіз отриманої акустичної характеристики показав, що при незмінних кутах установки лопаті та режиму роботи, форма лопаті впливає на зміну рівня акустичного тиску.

З досліджених форм лопаті, гвинт широкохордними лопатями (варіант лопаті №2) має найбільші значення рівня акустичного тиску на всіх частотах обертання, при зміні частоти обертання від 3000 до 11000 об/хв. рівень акустичного тиску зростає від 53,8 до 87,7 дБ.

Найкращі акустичні характеристики має гвинт з формою лопаті №3. В дослідженому діапазоні частот обертання рівень акустичного тиску змінюється від 51,5 до 85,3 дБ.

Акустична характеристика гвинта з шаблевидною формою лопатей не має значних відмінностей від акустичних характеристик гвинтів з формою лопаті № 5,6,7.

Гвинт з формою лопаті №1 має найнижчий рівень шуму на частоті обертання 4000 об/хв. Та 11000 об/хв., який становить відповідно 58,6 дБ та 84,8 дБ. Тому для подальших досліджень обрано гвинт з саме цією формою лопаті.

У другій частині дослідження було проведено оцінку впливу кількості лопатей гвинта на зміну рівня акустичного тиску в ближньому полі.

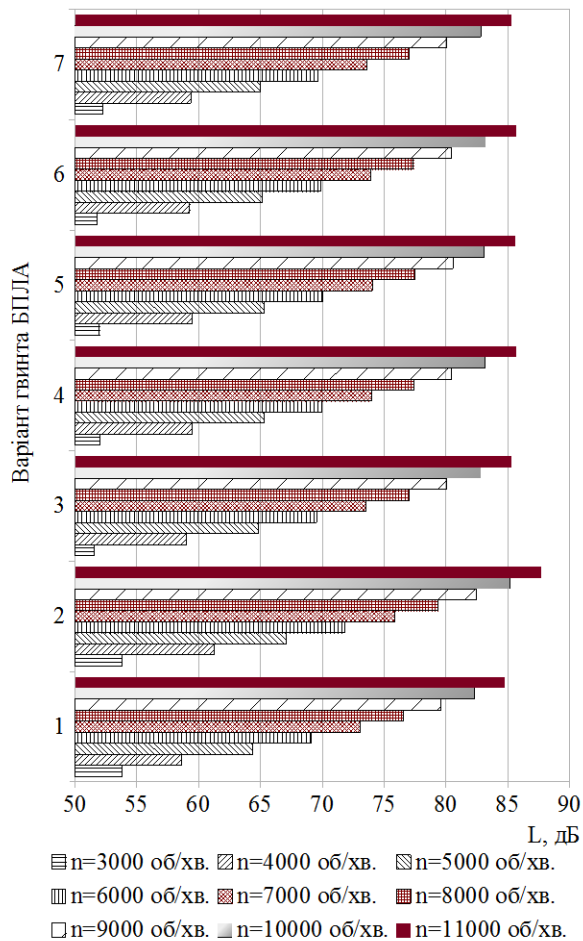


Рис. 3. Акустична характеристика гвинтів з різною формою лопаті

На основі моделі дволопатевого гвинта варіанту №1 були спроектовані моделі гвинтів з трьома, чотирма та п'ятьма лопатями (див. рис. 2). В результаті проведення моделювання течії розраховано рівень акустичного тиску за першими шістьма гармоніками в ближньому акустичному полі. Розрахунки проводились для частот обертання від 3000 до 11000 об/хв. Отримані залежності рівня акустичного тиску від частоти обертання представлено на рис. 4.

Отримані дані зміни рівня акустичного тиску гвинтів з різною кількістю лопатей показують, що кількість лопатей впливає на генерування акустичного випромінювання. Збільшення кількості лопатей призводить до погіршення акустичних характеристик, рівень звукового тиску зростає. При збільшенні лопатей від двох до п'яти рівень акустичного тиску збільшився на 0,8...3,5 дБ. Зростання рівня акустичного тиску у трилопатевого гвинта БПЛА і в порівнянні з дволопатевою становить до 2,2 дБ. При збільшенні лопатей до чотирьох, рівень звукового тиску, в порівнянні з трилопатевою гвинтом, зростає на 1дБ. Як і у випадку збільшення лопатей з чотирьох до п'яти

призводить до зростання рівня акустичного тиску на 1дБ.

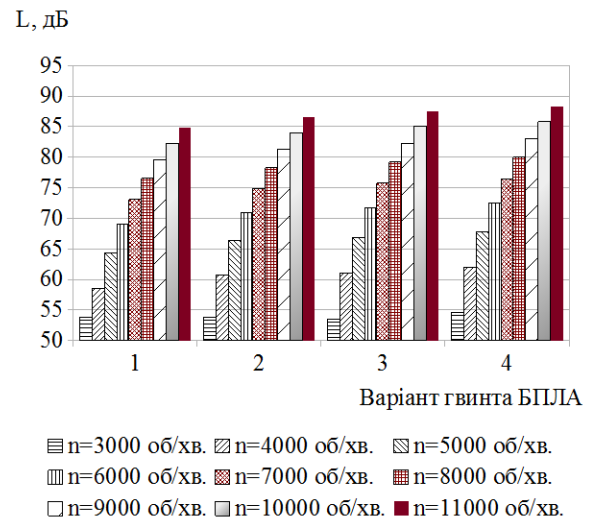


Рис. 4. Акустична характеристика гвинтів з різною кількістю лопатей

## Висновки

В роботі представлена оцінка впливу форми та кількості лопатей гвинтів БПЛА на рівень акустичного тиску у ближньому акустичному полі.

Показано, що форма лопаті впливає на акустичні характеристики гвинтів. Гвинт з широкохордною формою лопаті має найгірші акустичні характеристики в дослідженому діапазоні частот обертання. Застосування шаблеподібної форми лопаті не призвело до зменшення рівня акустичного тиску. Рівень акустичного тиску при частоті обертання гвинта з шаблеподібною формою лопаті від 3000 до 11000 об/хв. такий же, як і рівень акустичного тиску гвинтів з формою лопаті №5, 6, 7.

Отримані дані зміни рівня акустичного тиску гвинтів з різною кількістю лопатей показують, що кількість лопатей впливає на генерування акустичного випромінювання. При збільшенні лопатей від двох до п'яти рівень акустичного тиску збільшився на 0,8...3,5 дБ.

## Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

### Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він не використовував технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

### Подяка

Автор висловлює подяку кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. Fahlstrom, P. G., *Introduction to UAV systems [Text]* / P. G. Fahlstrom, T. J. Gleason, & M. H. Sadraey. – John Wiley & Sons., 2022. – 464 p.
2. Sinibaldi, G. *Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. [Text]* / G. Sinibaldi, & L. Marino // *Applied Acoustics*. – 2013. – Vol. 74, Iss. 1. – P. 79-88. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2012.06.011.
3. Marino, L. *Experimental analysis of UAV propeller noise. [Text]* / L. Marino // *In 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. – 2010. – P. 3854.
4. Lukianov, P. *Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi [Text]* / P. Lukianov, O. Dusheba // *Aerospace Technic and Technology*. – 2023. – Vol.4. – P. 38-49. DOI: 10.32620/akt.2023.4.05
5. Zawodny, N. *Identification and Reduction of Interactional Noise of a Quadcopter in Hover and Forward Flight Conditions. [Text]* / N. Zawodny, N. Pettingill, & C. Thurman // *In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 265, Iss. 5. – P. 2947-2958. DOI: 10.3397/IN\_2022\_0415.
6. Smith, B. *Comparison of Tonal Noise Characteristics of Large Multicopters with Phased Rotors [Text]* / B. Smith, F. Gandhi, & R. Niemiec // *Journal of the American Helicopter Society*. – 2023. – Vol. 68, Iss. 3. – P. 32008-32021. DOI: 10.4050/JAHS.68.032008.

7. *Experimental study on noise reduction of a wavy multi-copter rotor [Text]* / Y. Yang, Y. Liu, H. Hu [et al] // *Applied Acoustics*. – 2020. – Vol. 165. – Article No. 107311. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2020.107311.

8. Foreman, J. *Sound analysis and noise control [Text]* / J. Foreman. – Springer Science & Business Media. – 1990. – 461p. DOI: 10.1007/978-1-4684-6677-5.

### References

1. Fahlstrom, P. G., Gleason, T. J., & Sadraey, M. H. *Introduction to UAV systems*. John Wiley & Sons, 2022. 464 p.
2. Sinibaldi, G., & Marino, L. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. *Applied Acoustics*, 2013, vol. 74, iss. 1, pp. 79-88. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2012.06.011.
3. Marino, L. Experimental analysis of UAV propeller noise. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2010, pp. 3854.
4. Lukianov, P., & Dusheba, O. Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2023, vol. 4, pp. 38-49. DOI: 10.32620/akt.2023.4.05.
5. Zawodny, N., Pettingill, N., & Thurman, C. Identification and Reduction of Interactional Noise of a Quadcopter in Hover and Forward Flight Conditions. *In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2023, vol. 265, iss. 5, pp. 2947-2958. DOI: 10.3397/IN\_2022\_0415.
6. Smith, B., Gandhi, F., & Niemiec, R. A Comparison of Tonal Noise Characteristics of Large Multicopters with Phased Rotors. *Journal of the American Helicopter Society*, 2023, vol. 68(3), pp. 32008-32021. DOI: 10.4050/JAHS.68.032008.
7. Yang, Y., Liu, Y., Hu, H., Liu, X., Wang, Y., Arcondoulis, E. J., & Li, Z. Experimental study on noise reduction of a wavy multi-copter rotor. *Applied Acoustics*, 2020, vol. 165, article no. 107311. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2020.107311.
8. Foreman, J. *Sound analysis and noise control*. Springer Science & Business Media. 1990. 461 p. DOI: 10.1007/978-1-4684-6677-5.

Надійшла до редакції 10.05.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

## ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF UAV PROPELLER

Artem Kovtun

**The subject** of this study is the acoustic characteristics of the propeller of an unmanned aerial vehicle. **The object** of this study is the propeller of an unmanned aerial vehicle. **The purpose** of this work was to assess the influence of the shape and number of blades on the change in the sound pressure level of the propeller of an unmanned aerial vehicle. To achieve this purpose, the following **tasks** were solved: modeling the flow in seven two-bladed

propellers with different blade shapes; modeling the flow in the propeller of an unmanned aerial vehicle with 2-5 blades. The flow on the propeller was studied using the numerical experiment **method**. Acoustic characteristics were calculated based on the aerodynamic characteristics of the propeller. The sound pressure level  $L$  was estimated in the near-acoustic field for the first six harmonics. **Results:** The change in the acoustic pressure level for seven propellers of unmanned aerial vehicles with different blade shapes was studied. The peripheral and hub diameters, blade installation angles, and operating modes did not change for any of the studied propeller variants. The analysis of the obtained acoustic characteristics showed that at constant blade installation angles and operating modes, the shape of the blade affected the change in the sound pressure level. A propeller with a wide-chord blade has the worst acoustic characteristics among the studied rotational speeds. The use of a saber-shaped blade did not decrease the acoustic pressure. Sound pressure at a rotating speed of a propeller with a saber-shaped blade ranging from 3000 to 11000 rpm. is the same as the acoustic pressure of propellers with blade shapes No. 5, 6, and 7. The data on changes in the acoustic pressure of propellers with different numbers of blades showed that the number of blades affected the generation of acoustic radiation. As the blades were increased from two to five, the sound pressure level increased by 0.8...3.5 dB. **The scientific novelty and practical significance** of the conducted research lies in the fact that new data were obtained on the influence of the shape of the propeller blade of an unmanned aerial vehicle on the sound pressure level in the near field. The obtained data will help create and optimizing the parameters of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** propeller; blade shape; UAV; sound pressure level; flow modeling; near acoustic field; rotation frequency.

**Ковтун Артем Анатолійович** – асп. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

**Artem Kovtun** – PhD Student, Department of Aircraft Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: 8274925@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0009-0006-4327-8151.