

УДК 629.7.014-519.026.55:534.6

doi: 10.32620/aktt.2024.4.07

А. А. КОВТУН¹, А. О. МЕЛЬЧЕНКО¹, К. В. БАЛАЛАЄВА¹, В. Ю. УСЕНКО²¹ Національний авіаційний університет, Київ, Україна² ДП «Антонов»

АКУСТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАКАПОТОВАНОГО ГВИНТА БПЛА

Предметом дослідження є акустичне випромінювання закапотованого гвинта безпілотного літального апарату. **Об'єктом** дослідження є закапотований гвинт квадрокоптера. Периферійний діаметр гвинта – 128 мм, товщина капоту – 2 мм. Гвинт обертається разом з капотом. **Метою** роботи є оцінка впливу капоту на акустичне випромінювання гвинта БПЛА. В роботі поставлено та вирішено наступні задачі: порівняння значень рівня звукового тиску відкритого та закапотованого гвинта безпілотного літального апарату; візуалізація джерел широкосмугового шуму закапотованого гвинта. Дослідження течії у закапотованому та відкритому гвинті проводилось **методом** чисельного експерименту. Рівень звукового тиску розраховувався в ближньому акустичному полі (радіус 1 м) як сума акустичного випромінювання перших шести гармонік. Для візуалізації джерел шуму використовувалася модель широкосмугового шуму отримана на основі формули Правдмана, за допомогою якої розраховується загальна звукова потужність. **Результати:** На основі моделювання течії у відкритому та закапотованому гвинті БПЛА отримані значення рівня звукової потужності для кожного дослідженого режиму роботи. На всіх досліджених режимах роботи при частоті обертання 3000...10000 об/хв. рівень акустичного тиску гвинта БПЛА значно знизився завдяки застосуванню капоту. Найбільше зниження шуму відповідає нижчим частотам обертання. Закапотований гвинт має акустичне випромінювання на 6,97...6,3 дБ нижче, ніж відкритий в діапазоні частоти обертання 3000...10000 об/хв. відповідно. Візуалізація джерел широкосмугового шуму при обтіканні за капотованого гвинта БПЛА показує, що основним джерелом широкосмугового шуму виступає капот. Зони з візуалізацією широкосмугового шуму наявні, як на нижній так і на верхній кромці капоту. **Наукова новизна та практична значимість** проведених досліджень полягає в тому, що отримані нові дані щодо впливу капоту гвинта безпілотного літального апарату типу квадрокоптер на акустичне випромінювання. Отримані дані допоможуть у створенні гвинтів безпілотних літальних апаратів з покращеними акустичними характеристиками.

Ключові слова: гвинт; безпілотний літальний апарат; капот; шум; рівень звукового тиску; моделювання течії; відкритий гвинт; закапотований гвинт; широкосмуговий шум; акустичне випромінювання.

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) на сьогоднішній день відіграють важливу роль у житті людей, їх застосування розповсюджується на багато сфер людської діяльності. Але, разом з тим, окрім той користі, яку несуть БПЛА, є суттєвий недолік – акустичне забруднення. Важливою проблемою, яка потребує вирішення, є зменшення рівня акустичного випромінювання БПЛА. При польоті основними джерелами шуму БПЛА є його гвинти. Серед засобів зниження шуму гвинтів можна виділити наступні: оптимізація геометричних параметрів лопаті, оптимізація кількості лопатей та кількості гвинтів, застосування дворядних гвинтів, зниження частоти обертання гвинта, застосування капоту. Такий метод як застосування капоту заслуговує особливої уваги. В якості недоліку конструкції за капотованого гвинта можна відзначити збільшення ваги.

Закапотовані гвинти широко використовуються в літаках вертикального зльоту та посадки через високу ефективність тяги та безпеки. Ефективність та

стійкість закапотованих гвинтів погіршуються в деяких умовах польоту, наприклад, при зависанні або при бічному вітрі. У статті [1] представлений докладний огляд конструктивних особливостей закапотованих гвинтів для вертикального зльоту та посадки, розглянуто методи підвищення ефективності та стійкості закапотованих гвинтів.

У роботі [2] представлено розробку співвісного закапотованого гвинта для БПЛА. Автори представили широкий спектр досліджень характеристик розробленого гвинта, включаючи вибір матеріалу, профілів та ін. Розроблений гвинт має модифікований капот, забезпечує високу ефективність та необхідний рівень міцності. Дослідження виконані у програмному середовищі Ansys Workbench 17.2.

Метою дослідження [3] було визначення можливості застосування капотів для невеликих дронів. Одна з явних переваг застосування капота, що розглядаються у статті, забезпечення мінімального рівня травмування лопатями під час гонок дронів з видом від першої особи (FPV) та у кінематографії. До того

ж, додавання капота дозволяє покращити тягову потужність усієї силової установки дрона. Автори у своєму дослідженні приділяють увагу зміні тяги гвинта за наявності капота – тяга гвинта зменшується, однак сумарна тяга збільшується за рахунок тяги, яку створює капот. Також увага авторів акцентується на впливі значення зазору між кінцем лопаті гвинта та капотом. Дослідження проведено в ANSYS Fluent. У роботі також представлені дослідження, спрямовані на вибір оптимальної довжини капота, цільовою функцією оптимізації виступає максимізація тяги закапотованого гвинта.

У роботі [4] вплив капота на характеристики повітряного гвинта досліджено на основі методу RANS з моделлю турбулентності SST k- ω . У роботі досліджувалися характеристики відкритого та закапотованого однорядного та співвісного гвинта, форма капота також змінювалася. Показано, що капот дозволяє збільшити сумарну тягу при зменшенні тяги гвинта і крутного моменту. Крутий момент значно збільшується, коли капот обертається разом із гвинтом. Основні параметри капота, які впливають на тягу та крутий момент – товщина перерізу та форма задньої кромки.

У роботі [5] експериментально та чисельно досліджено вплив акустично жорсткого капота на стійкий тональний шум, створюваний гвинтом БПЛА. Для вимірювання тиску на внутрішній поверхні капота з гвинтом, що обертається всередині, використовувався зондовий мікрофон, в результаті експериментів визначалося середнє за часом поле тиску, що обертається разом з гвинтом. Ці вимірювання були зіставлені з результатами моделювання URANS CFD і показали хорошу збіжність: вимірювання та розрахунки поширюються як на слід від кінчика лопаті, так і області низького та високого тиску над та під лопаттю гвинта. Повітряний гвинт, що працює всередині капота, зберігає високий розподіл осьового навантаження в області закінцівок порівняно з ізольованим повітряним гвинтом, проте загальна сила гвинта, в капоті, була нижчою, оскільки капот створював значну тягу. Зменшення навантаження на лопаті закапотованого гвинта призвело до того, що рівні тонального шуму, створювані джерелами на лопатях, стали нижчими порівняно з рівнями, що створюються еквівалентним ізольованим гвинтом. Автори встановили, що в акустичному ближньому та дальньому полі ефект капота знижує тональний шум для спостерігачів нижче за площину обертання гвинта в порівнянні з еквівалентним ізольованим гвинтом.

У роботі [6] описується експериментальне, чисельне та теоретичне дослідження впливу капота на два важливі механізми тонального/квазитонального шуму повітряного гвинта БПЛА. Розглядаються такі фактори генерації шуму: постійне навантаження, то-

вщина лопаті та турбулентний потік. Проведені експерименти дозволили автору виділити вплив цих факторів на генерацію шуму гвинтом БПЛА. Для випробуваної конфігурації гвинта з капотом показано, що ефект капота дозволяє знизити шум від таких факторів, як постійне навантаження і товщина лопаті для спостерігачів нижче площини обертання гвинта.

У статті [7] проведено аналіз точності розрахунку різних методик для чисельного моделювання характеристик гвинта (аеродинамічні, тягові, акустичні характеристики), результати чисельного моделювання порівнюються з результатами фізичного експерименту. Проаналізовано різні підходи до моделювання, включаючи оцінку Blade Element Momentum Theory (BEMT), рівняння Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) та моделювання методом Detached Eddy Simulations (DES). Рівень шуму оцінювався за найбільш значущих робочих умов шляхом застосування підходу Фокс-Уільямса Хоукінгса до розрахованих нестационарних результатів та спрощеного формулювання Фарасата до результатів BEMT. Чисельні розрахунки виконувалися з використанням програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, такого як OpenFOAM та libAcoustics у разі моделювання CFD або власних кодів для моделей низького порядку. Фізичний експеримент проведено в аеродинамічній трубі та в акустичній безеховій камері. Особливістю дослідження є порівняння характеристик вихідного гвинта і гвинта, надрукованого на 3D-принтері.

Отже, дослідження характеристик закапотованих гвинтів є актуальним.

Метою роботи є оцінка впливу капота на акустичне випромінювання гвинта БПЛА.

Для досягнення мети вирішено наступні задачі:

- порівняння значень рівня звукового тиску відкритого та закапотованого гвинта БПЛА;
- візуалізація джерел широкопasmового шуму закапотованого гвинта.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження обрано дволопатевий гвинт квадрокоптера в капоті. Периферійний діаметр гвинта – 128 мм, товщина капота 2 мм. Гвинт обертається разом з капотом. Тривимірна модель дволопатевого закапотованого гвинта квадрокоптера представлено на рис. 1.

Для проведення оцінки впливу капота на акустичне випромінювання гвинта проведено моделювання течії у відкритому та закапотованому гвинті. Розрахунки проводились при частоті обертання гвинта від $n=3000$ до $n=10000$ об/хв. при стандартних атмосферних умовах на землі ($H=0$ м). При розрахунку швидкість вітру становила 0 м/с.

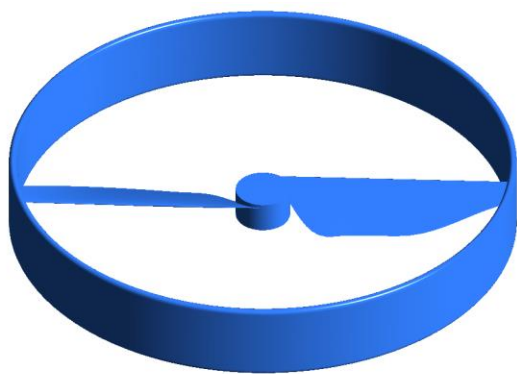


Рис. 1. Модель дволопатевого гвинта

Характеристики відкритого гвинта досліджено в роботі [8].

Для моделювання течії у досліджених гвинтах використовувався метод чисельного експерименту. Для замикання системи рівнянь системи Нав'є-Стокса використовувалась модель турбулентності SST Ментера. Розрахункова сітка відкритого та закапотованого гвинта будувалась з урахуванням приміжового шару, тип сітки – неструктурована.

Рівень звукового тиску розраховувався в ближньому акустичному полі (радіус 1 м) як сума акустичного випромінювання перших шести гармонік.

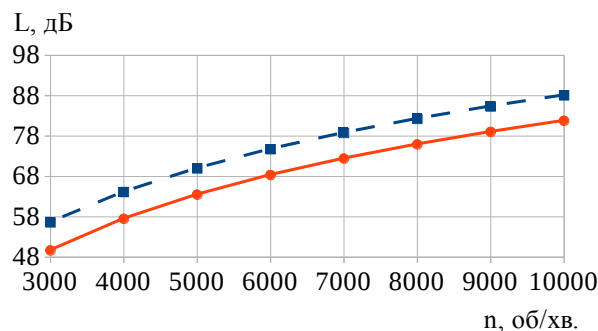
Крім того, для візуалізації джерел шуму використовувалась модель широкопasmового шуму отримана на основі формули Праудмана, за допомогою якої розраховується загальна звукова потужність. Відповідно до моделі звукова потужність оцінюється у всій області, що дозволяє візуалізувати ізоповерхні, які можна використовувати для визначення областей течії, які є джерелами генерації шуму [9].

Результати та обговорення

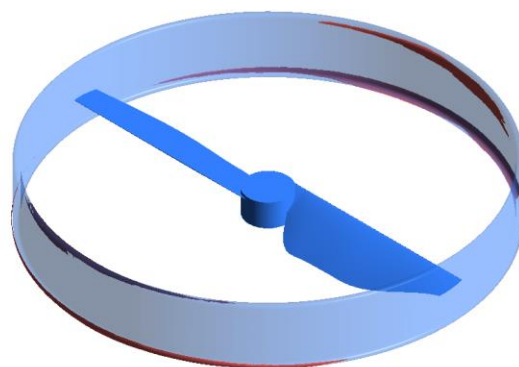
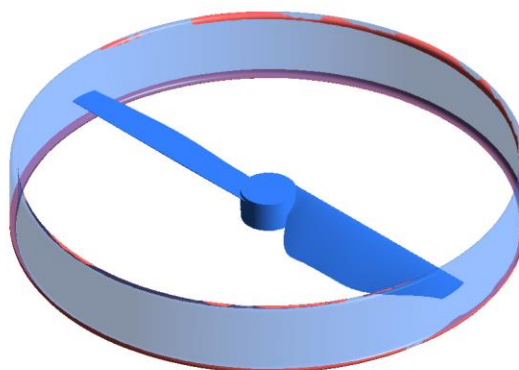
Відповідно до поставленої мети та задач на базі отриманого моделювання течії у відкритому та закапотованому гвинті БПЛА отримані значення рівня звукової потужності для кожного дослідженого режиму роботи. На рис. 2 представлена залежність рівня звукового тиску L від частоти обертання гвинта. На графіку штрихова лінія відображає залежність рівня звукового тиску відкритого гвинта БПЛА від частоти обертання, суцільна лінія – закапотованого гвинта БПЛА.

На всіх досліджених режимах роботи рівень акустичного тиску гвинта БПЛА значно знизився завдяки застосуванню капоту. Найбільше зниження шуму відповідає нижчим частотам обертання. Рівень звукового тиску відкритого гвинта в діапазоні частот обертання 3000...10000 об/хв становить 56,6...88,1 дБ, при наявності капоту - 49,7...81,8 дБ. Закапотована

ний гвинт має шум на 6,97...6,3 дБ нижче, ніж відкритий в діапазоні частоти обертання 3000...10000 об/хв. відповідно.

Рис. 2. Залежність рівня звукового тиску L від частоти обертання гвинта n

За допомогою застосування моделі Праудмана було отримано ізоповерхні широкопasmового акустичного випромінювання. Для прикладу на рис. 3,4 представлено отримані результати.

Рис. 3. Ізоповерхня широкопasmового акустичного випромінювання при частоті обертання $n=3000$ об/хвРис. 4. Ізоповерхня широкопasmового акустичного випромінювання при частоті обертання $n=10000$ об/хв

Візуалізація джерел широкопasmового шуму показує, що основним джерелом широкопasmового

шуму виступає капот. Ширококутовий шум зазвичай генерується при наявності турбулентності потоку, вихрового обтікання, нерівномірності потоку та ін. Також, можна відмітити, що на нижній кромці капоту зон з візуалізацією ширококутового шуму більше, ніж на верхній кромці як для режиму роботи при частоті обертання 3000 об/хв. так і для частоти обертання 10000 об/хв. Однак, не дивлячись на те, що капот є джерелом ширококутового шуму, значення ширококутового шуму відкритого гвинта вище, ніж закапотованого.

Слід відзначити, що недоліком конструкції закапотованого гвинта є збільшення маси. Наприклад, в даному випадку маса конструкції в 5,8 раз. Також, буде змінюватися тяга та потужність, необхідна для приводу гвинта. Це питання майбутніх досліджень. Однак, виходячи із досліджень в роботах [1-7], тяга закапотованого гвинта буде збільшуватися і при раціонально підібраній формі капоту потужність для приводу гвинта може бути зменшена або залишатися на рівні як і для відкритого гвинта.

Висновки

В роботі представлена оцінка шуму закапотованого гвинта БПЛА, капот і гвинт є єдиною системою, капот обертається разом із гвинтом.

На всіх досліджених режимах роботи при частоті обертання 3000...10000 об/хв. рівень акустичного тиску гвинта БПЛА значно знизився завдяки застосуванню капоту. Найбільше зниження шуму відповідає нижчим частотам обертання. Закапотований гвинт має шум на 6,97...6,3 дБ нижче, ніж відкритий в діапазоні частоти обертання 3000...10000 об/хв. відповідно.

Візуалізація джерел ширококутового шуму при обтіканні за капотованого гвинта БПЛА показує, що основним джерелом ширококутового шуму виступає капот.

Внесок авторів: формулювання проблеми – Катерина Балаласва, Вячеслав Усенко; огляд та аналіз інформаційних джерел – Андрій Мельченко, Артем Ковтун; постановка задачі – Артем Ковтун, Катерина Балаласва; побудова моделі та проведення моделювання – Андрій Мельченко, Артем Ковтун; оцінка результатів – Андрій Мельченко, Артем Ковтун, Катерина Балаласва, Вячеслав Усенко; формулювання висновків – Андрій Мельченко.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, 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.

Доступність даних

Рукопис є продовженням роботи <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/view/aktt.2023.4sup1.04/2094>

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Improving the performance of ducted fans for VTOL applications: A review [Text]* / Y. Qian, Y. Luo, X. Hu [et al] // *Science China Technological Sciences*. – 2022. – Vol. 65, iss. 11. – P. 2521-2541. DOI: 10.1007/S11431-021-2110-X.
2. *Design, control, aerodynamic performances, and structural integrity investigations of compact ducted drone with co-axial propeller for high altitude surveillance [Text]* / S. S. Jayakumar, I. P. Subramaniam, B. Stanislaus Arputharaj [et al] // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, iss. 1. – Article No. 6330. DOI: 10.1038/s41598-024-54174-x.
3. *Design Analysis of Open and Ducted Propellers in UAV Application [Text]* / A. F. Zakariaa, M. F. M. Nasirb, A. bin Mukhtar, M. N. Ridzuand // *Jurnal Kejuruteraan SI*. – 2022. – Vol. 5, iss. 2. – P. 119-125. DOI: 10.17576/jkukm-2022-si5(2)-13.
4. Lu, D. *Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Ducted Propeller [Text]* / D. Lu, T. Sun, G. Zhang // *Ship & Boat*. – 2023. – Vol. 34, iss. 06. – Article No. 102. DOI: 10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.06.102.
5. *Experimental and numerical investigation of the sound field produced by a shrouded UAV propeller [Text]* / S. T. Go, M. J. Kingan, Y. Wu, R. N. Sharma // *Applied Acoustics*. – 2023. – Vol. 211. – 13 p. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2023.109523.
6. Go, S. T. *Shrouded UAV Propeller Noise [Text]: Thesis. ... Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering* / Sung Tyaeek Go. – Auckland, 2024. – 146 p.

7. Numerical and Experimental Evaluation of Noise and Performance in UAV Propellers [Text] / J. R. Serrano, J. García-Tíscar, P. Quintero, F. N. Ramírez // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. – 2023. – Vol. 86939. – 10 p. Doi: 10.1115/Gt2023-102389.

8. Характеристики повітряного гвинта квадрокоптера [Текст] / К. В. Балалаєва, А. В. Балалаєв, Г. Г. Голембієвський, А. А. Ковтун // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4 спецвипуск I (189). – С. 23-28. DOI: 10.32620/akt.2023.4sup1.04.

9. Bose, T. *Aerodynamic noise: an introduction for physicists and engineers* [Text] / T. Bose. – Springer Science & Business Media. – 2012. – 170 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-5019-1.

References

1. Qian, Y., Luo, Y., Hu, X., Zeng, Z., & Zhang, Y. Improving the performance of ducted fans for VTOL applications: A review. *Science China Technological Sciences*, 2022, vol. 65, iss. 11, pp. 2521-2541. DOI: 10.1007/s11431-021-2110-x.

2. Jayakumar, S. S., Subramaniam, I. P., Stanislaus Arputharaj, B., Solaippan, S. K., Rajendran, P., Lee, I. E., & Raja, V. Design, control, aerodynamic performances, and structural integrity investigations of compact ducted drone with co-axial propeller for high altitude surveillance. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, iss. 1, article no. 6330. DOI: 10.1038/s41598-024-54174-x.

3. Zakariaa, A. F., Nasirb, M. F. M., bin Mukhtar, A., & Ridzuand, M. N. Design Analysis of Open and

Ducted Propellers in UAV Application. *Jurnal Kejuruteraan SI*, 2022, vol. 5, iss. 2, pp. 119-125. DOI: 10.17576/jkukm-2022-si5(2)-13.

4. Lu, D., Sun, T., & Zhang, G. Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Ducted Propeller. *Ship & Boat*, 2023, vol. 34, iss. 06, article no. 102. DOI: 10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.06.102.

5. Go, S. T., Kingan, M. J., Wu, Y., & Sharma, R. N. Experimental and numerical investigation of the sound field produced by a shrouded UAV propeller. *Applied Acoustics*, 2023, vol. 211, article no. 109523. 13 p. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2023.109523.

6. Go, S. T. *Shrouded UAV Propeller Noise* [Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering Thesis]. Auckland, 2024. 146 p.

7. Serrano, J. R., García-Tíscar, J., Quintero, P., & Ramírez, F. N. Numerical and Experimental Evaluation of Noise and Performance in UAV Propellers. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2023, vol. 86939, 10 p. DOI: 10.1115/gt2023-102389.

8. Balalaieva, K. V., Balalaiev, A. V., Golembiyevskyy, G. G., & Kovtun, A. A. Kharakterystyky povitryanoho hvynta kvadrokoptera [Quadrocopter propeller specifications]. *Aerospace technic and technology*, 2023, no. 4sup1 (189), pp. 23-28. DOI: 10.32620/akt.2023.4sup1.04.

9. Bose, T. *Aerodynamic noise: an introduction for physicists and engineers*. Springer Science & Business Media, 2012. 170 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-5019-1.

Надійшла до редакції 15.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

ACOUSTIC RADIATION OF A DUCTED UAV PROPELLER

Artem Kovtun, Andrii Melchenko,
Kateryna Balalaieva, Vyacheslav Usenko

The subject of this study was the acoustic radiation of the ducted propeller of an unmanned aerial vehicle. The object of this study was the ducted propeller of a quadcopter. The peripheral diameter of the propeller was 128 mm, and the thickness of the duct was 2 mm. The propeller rotates with the duct. The purpose of this work was to assess the influence of the duct on the acoustic radiation of the propeller of an unmanned aerial vehicle. The following tasks were set and solved in this work: a comparison of the sound pressure level values of the open and ducted propeller of an unmanned aerial vehicle; visualization of sources of broadband noise from the ducted propeller. The flow in a ducted and open propeller was studied using the numerical experiment method. The sound pressure level was calculated in the near acoustic field (radius 1 m) by summing the acoustic radiation of the first six harmonics. To visualize the noise sources, a broadband noise model was used, derived from Proudman's formula, which calculates the total sound power. Results: Based on modeling the flow in the open and ducted propeller of an unmanned aerial vehicle, values of the sound power level were obtained for each operating mode studied. In all studied operating modes at a rotation speed of 3000...10000 rpm. The acoustic pressure level of the unmanned aerial vehicle propeller was significantly reduced due to the use of a duct. The greatest noise reduction corresponds to lower speeds. A ducted propeller has an acoustic radiation of 6.97 dB–6.3 dB lower than an open propeller in the rotation speed range of 3000...10000 rpm. Visualization of sources of broadband noise during flow around an unmanned aerial vehicle with its duct propeller shows that the main source of broadband noise is the duct. Zones displaying broadband noise are available on

both the lower and upper edges of the duct. The scientific novelty and practical significance of the conducted research lies in the fact that new data were obtained on the effect of the ducted propeller of an unmanned aerial vehicle such as a quadcopter on acoustic radiation. The obtained data will help create propellers for unmanned aerial vehicles with improved acoustic characteristics.

Keywords: propeller; unmanned aerial vehicle; duct; noise; sound pressure level; flow modeling; open screw; ducted propeller; broadband noise; acoustic radiation.

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

Мельченко Андрій Олегович – асп. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Балаласва Катерина Вікторівна – докторка техн. наук, доц., проф. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Усенко Вячеслав Юрійович – канд. техн. наук, головний конструктор з силових установок та систем життєзабезпечення, ДП «Антонов», 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.

Andrii Melchenko – PhD Student, Department of Aircraft Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: 3960950@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0009-0005-2639-5615.

Kateryna Balalaieva – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Aviation Engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kiki_ua@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6495-3263.

Vyacheslav Usenko – Candidate of Technical Sciences, Chief Designer of Power Plants and Life Support Systems, State Enterprise «Antonov», Kyiv, Ukraine, e-mail: uvy1758@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4794-9294.