

УДК 621.45.032.3

doi: 10.32620/aktt.2025.4.04

А. А. БАЛАЛАЄВ¹, К. В. БАЛАЛАЄВА¹, Г. Г. ГОЛЕМБІЄВСЬКИЙ¹,
А. І. МЕЛЬЧЕНКО¹, В. Ю. УСЕНКО²

¹ Державне некомерційне підприємство «Державний університет
«Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

² Акціонерне підприємство «Антонов», Київ, Україна

ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАКАПОТОВАНОГО ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА БПЛА

Предмет дослідження – мінімізація маси капота закапотованого повітряного гвинта БПЛА. **Об’єкт** дослідження – дволопатевий закапотований гвинт квадрокоптера. Периферійний діаметр повітряного гвинта – 128 мм, товщина капоту – 2 мм. Гвинт обертається разом з капотом. **Метою** роботи є аналіз конструкції закапотованого гвинта БПЛА щодо зменшення маси шляхом застосування методів топологічної оптимізації. Для досягнення поставленої мети вирішено наступні задачі: проведено розрахунок напружено-деформованого стану закапотованого гвинта БПЛА в умовах статичної міцності; проведено топологічну оптимізацію капота повітряного гвинта БПЛА; побудовано модель закапотованого гвинта з урахуванням топологічної оптимізації. Під час дослідження використано методи числового експерименту та метод топологічної оптимізації. Розрахунки проводились в програмному середовищі Ansys Workbench, для обраної задачі використовувались модулі Geometry, Static Structural, Structural Optimization. Представлено **результати** щодо аналізу конструкції закапотованого повітряного гвинта БПЛА з метою зменшення маси шляхом застосування методів топологічної оптимізації. На основі результатів розрахунку напружено-деформованого стану закапотованого гвинта БПЛА в умовах статичної міцності проведено топологічну оптимізацію капота. Результати топологічної оптимізації дозволили полегшити конструкцію капота завдяки додаванню отворів у вигляді овальних – круглих вікон у нижній частині капота та змінити форму верхньої кромки капота – зробити її хвиляподібною. На основі результатів топологічної оптимізації побудовано оновлену модель закапотованого повітряного гвинта БПЛА. Закапотований повітряний гвинт має вагу менше на 20,23 % та має необхідний запас міцності. Наступними дослідженнями є оцінка аеродинамічних характеристик закапотованого повітряного гвинта з оновленою формою капота. **Наукова новизна та практична значимість роботи:** отримано нові дані щодо аналізу полегшення конструкції закапотованого гвинта БПЛА шляхом застосування топологічної оптимізації. Отримані результати можуть бути використані при розробці перспективних повітряних гвинтів БПЛА.

Ключові слова: повітряний гвинт; капот; БПЛА; топологічна оптимізація; числове моделювання; статична міцність; напружено-деформований стан; маса.

Вступ

В даний час через можливість віртуального тестування конструкції проєктованих об’єктів авіаційного призначення повинні бути оптимізовані методами CAD/CAM/CAE, потім на заключному етапі зразок повинен бути експериментально перевірений і вироблений. Методи виробництва повинні мати справу з інноваційними методами швидкого прототипування, щоб скоротити час виходу ринку. У роботі [1] автори представляють приклад застосування оптимізації методів CAD/CAM/CAE при створенні авіаційного двигуна. Авторами протягом року велися роботи з пошуку найкращих варіантів конструкції двигуна за допомогою топологічної, геометричної та структурної оптимізації. Результат перевершив їх очікування – від базового варіанта з вагою близько 65 кг зі 126 деталями отримали проєкт двигуна з 40 кг і 92 деталей.

Методи оптимізації знайшли широке застосування при розробці безпілотного літального апарату (БПЛА) - проєктуванні гвинта [2, 3], плануванні місії [4, 5], конструкції БПЛА [6, 7] та його силової установки [8]. У науковій статті [2] наведено результати оптимізації повітряного гвинта, розробленого для БПЛА на сонячній енергії для польоту на висоті 22 км. Метою проєктування 3-лопатевого гвинта було досягнення ККД 72% і тяги 7 Н при діаметрі гвинта 0,5588 м, з частотою обертання 5500 об/хв при набігаючій швидкості потоку 50 м/с. Авторами було проведено оптимізацію десяти геометричних параметрів гвинта, у тому числі хорди, кута установки лопаті. При розрахунку авторами використовувалося моделювання на основі вихрової теорії у програмі MATLAB, також проводилося моделювання обтікання гвинта методами CFD. Крім того, використали метод оптимального проєктування з цільовою



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

функцією підвищення ККД гвинта з використанням програмного забезпечення ISIGHT.

У роботі [3] проведено глибокий аналіз методів оптимізації гребних гвинтів із цільовими функціями мінімізації акустичного випромінювання та максимізації ККД. Провівши дослідження, автори роблять висновок, що при оптимізації доцільніше використовувати методи, засновані на нейронних мережах та сурогатні моделі, які враховують специфіку роботи гребних гвинтів. У роботі [9] представлені результати дослідження щодо проектування та створення повітряного гвинта для БПЛА, при проектуванні автори використовують метод топологічної оптимізації.

Топологічна оптимізація – це метод обчислювального проектування для автоматичного створення структурного компонування з максимальними параметрами ефективності відповідно до заданих обмежень. Іншими словами, топологічна оптимізація – це метод, який дозволяє вирішити задачу оптимізації розподілу матеріалу в дискретній галузі проектування [10, 11].

Одним з перспективних напрямків покращення характеристик та вдосконалення конструкції гвинтів БПЛА є використання гвинта в капоті або кільці. Це збільшує живучість гвинта і зменшує травмування людей або тварин від лопатей гвинта, що обертаються [12-14].

В роботі [15] авторами показано, що акустичні характеристики закапотованого гвинта покращуються, але при додаванні кільця з'являється один суттєвий недолік – збільшення маси. В роботі [14] маса конструкції збільшилась в 5,8 раз, що є дуже суттєвим для невеликих БПЛА. Отже, існує проблема щодо покращення вагових характеристик кільця для за капотованого гвинта БПЛА.

Беручи до уваги проведений аналіз досліджень щодо використання методів топологічної оптимізації, авторами ставиться за мету провести аналіз конструкції закапотованого гвинта БПЛА щодо зменшення маси шляхом застосування методів топологічної оптимізації. Для досягнення поставленої мети виконано наступні задачі:

1. Проведено розрахунок напружено-деформованого стану закапотованого гвинта БПЛА в умовах статичної міцності.
2. Проведено топологічну оптимізацію капоту повітряного гвинта БПЛА.
3. Побудовано модель за капотованого гвинта з урахуванням топологічної оптимізації.

Постановка задачі дослідження

В роботі у якості об'єкта дослідження обрано дволопатевиі закапотований гвинт квадрокоптера. Периферійний діаметр повітряного гвинта – 128 мм, товщина капоту – 2 мм. Гвинт обертається разом з капотом.

На рис.1. показано тривимірну модель вихідного закапотованого гвинта.

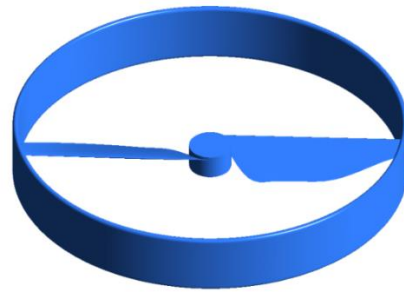


Рис.1. Тривимірна модель вихідного закапотованого гвинта

Для дослідження обрано числовий експеримент, який проводиться в програмному середовищі Ansys Workbench. Для обраної задачі використовувались модулі Geometry, Mesh, CFX, Static Structural, Structural Optimization.

Результати

Модуль Geometry використовувався для створення геометрії закапотованого гвинта. В модулі Mesh побудовано розрахункову сітку для дослідження в модулі CFX аеродинамічних характеристик та аеродинамічних сил при обтіканні повітряного гвинта в капоті. Дані з розрахунку з модуля CFX передаються в модуль Static Structural, також додається умова дії відцентрових сил та крутного моменту. Наступним кроком під'єднується модуль Structural Optimization, в якому на базі розрахунку напружено-деформованого стану закапотованого гвинта БПЛА в умовах статичної міцності проводиться топологічна оптимізація капоту.

На рис.2 представлено результат топологічної оптимізації капоту, отриманий в модулі Structural Optimization.



Рис. 2. Фрагмент капоту гвинта після топологічної оптимізації

Отриманий результат говорить про те, що є можливість полегшити конструкцію капоту завдяки додаванню отворів у вигляді овальних – круглих вікон в нижній частині капоту та змінити форму верхньої кромки капоту – зробити її хвиляподібною. Авторами було прийнято рішення, що отвори матимуть форму супереліпсу. Ширина, висота та відстань між двома сусідніми супереліпсами обрано на основі отриманих результатів топологічної оптимізації.

На рис.3 представлено тривимірну модель оптимізованого закапотованого гвинта БПЛА на основі топологічної оптимізації.

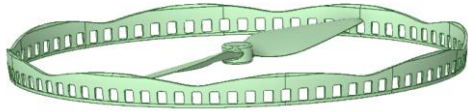


Рис.3. Тривимірна модель оптимізованого закапотованого гвинта БПЛА

Отримана модель закапотованого гвинта БПЛА має вагу на 20,23% менше, ніж базовий закапотований гвинт, при цьому вона має необхідний запас за міцністю.

Наступна задача полягає в дослідженні аеродинамічних характеристик отриманого закапотованого гвинта.

Висновки

Представлені результати щодо аналізу конструкції закапотованого повітряного гвинта БПЛА з метою зменшення маси шляхом застосування методів топологічної оптимізації.

На основі результатів розрахунку напружено-деформованого стану закапотованого гвинта БПЛА в умовах статичної міцності проведено топологічну оптимізацію капоту. На основі результатів топологічної оптимізації побудовано оновлену модель закапотованого повітряного гвинта БПЛА. Закапотований повітряний гвинт має вагу менше на 20,23 % та має необхідний запас міцності.

Наступними дослідженнями є оцінка аеродинамічних характеристик за капотованого повітряного гвинта з оновленою формою капоту.

Внесок авторів: формулювання проблеми – А.О. Мельченко, К.В. Балалаєва, Г.Г. Голембієвський; огляд та аналіз інформаційних джерел – В.Ю. Усенко; розробка моделей для дослідження – А.О. Мельченко, А.В. Балалаєв; постановка задачі дослідження та проведення розрахунку напружено-деформованого стану закапотованого повітряного гвинта – А.О. Мельченко, А.В. Балалаєв, Г.Г. Голембієвський; аналіз результатів дослідження – К.В. Балалаєва, В.Ю. Усенко; побудова оптимізованої моделі за капотованого повітряного гвинта БПЛА – А.О. Мельченко, А.В. Балалаєв; формулювання висновків – К.В. Балалаєва, Г.Г. Голембієвський.

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.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

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

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Piancastelli, L. Topological, geometrical and structural optimization of complex mechanical systems [Text] / L. Piancastelli, D. Francia, & C. Renzi // 20 Congreso Internacional de Ingenieria Grafica. – 2008. – 9 p.
2. Design and optimization of a high-altitude long endurance UAV propeller [Text] / K. You, X. Zhao, S. Z. Zhao, & M. Faisal // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 926, № 1. – Article No. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/926/1/012018.
3. Hydro-acoustic optimization of propellers: A review of design methods [Text] / A. Portillo-Juan, S. Saettone, P. Andersen, & E. Ferrer // Applied Ocean Research. – 2024. – Vol. 151. – 25 p. DOI: 10.1016/j.apor.2024.104158.
4. GAMPP: Genetic algorithm for UAV mission planning problems [Text] / G. Bello-Ortiz, C. Ramirez-Atencia, J. Fradera-Gil, & D. Camacho // Intelligent Distributed Computing IX: Proceedings of the 9th International Symposium on Intelligent Distributed Computing–IDC'2015, Guimarães, Portugal. – 2015. – P. 167-176. DOI: 10.1007/978-3-319-25017-5_16.
5. Roberge, V. Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU [Text] / V. Roberge, M. Tarbouchi, & G. Labonté // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2018. – Vol. 54, iss. 5. – P. 2105-2117. DOI: 10.1109/TAES.2018.2807558.
6. Ahuja, V. Optimization of UAV designs for aerodynamic performance using genetic algorithms [Text] / V. Ahuja, & R. Hartfield // 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th. – 2010. – Article no. 2759. DOI: 10.2514/6.2010-2759.
7. UAV aerodynamic design involving genetic algorithm and artificial neural network for wing preliminary computation [Text] / A. Boutemedjet, M. Samardžić, L. Rebhi, & et al. // Aerospace Science and Technology. – 2019. – Vol. 84. – P. 464-483. DOI: 10.1016/j.ast.2018.09.043
8. Dinc, A. Optimization of a turboprop UAV for maximum loiter and specific power using genetic algorithm [Text] / A. Dinc // International Journal of Turbo

& Jet-Engines. – 2016. – Vol. 33, iss. 3. – P. 265-273. DOI: 10.1515/tjj-2015-0030.

9. Structural design of a large-scale 3D-printed high-altitude propeller: methodology and experimental validation [Text] / A. Malim, N. Mourousias, B. G. Marinus, & T. De Troyer // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10, iss. 3. – Article no. 256. – 21 p. DOI: 10.3390/aerospace10030256.

10. Wu, J. Topology optimization of multi-scale structures: a review [Text] / J. Wu, O. Sigmund, & J. P. Groen // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2021. – Vol. 63. – P. 1455-1480. DOI: 10.1007/s00158-021-02881-8.

11. Sigmund, O. Topology optimization approaches: A comparative review [Text] / O. Sigmund, & K. Maute // *Structural and multidisciplinary optimization*. – 2013. – Vol. 48, iss. 6. – P. 1031-1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6.

12. 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.

13. Yilmaz, S. Performance of a ducted propeller designed for UAV applications at zero angle of attack flight: An experimental study [Text] / S. Yilmaz, D. Erdem, & M. S. Kavsoglu // *Aerospace Science and Technology*. – 2015. – Vol. 45. – P. 376-386. DOI: 10.1016/j.ast.2015.06.005.

14. Experimental characterization of noise radiation from a ducted propeller of an unmanned aerial vehicle [Text] / A. M. Malgoezar, A. Vieira, M. Snellen, & et al. // *International Journal of Aeroacoustics*. 2019. – Vol. 18, iss. 4-5. – P. 372-391. DOI: 10.1177/1475472X19852952.

15. Акустичне випромінювання закапотованого гвинта БПЛА [Текст] / А. А. Ковтун, А. О. Мельченко, К. В. Балалаєва, & В. Ю. Усенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2024. – № 4 (196). – С. 58-63. DOI: 10.32620/aktt.2024.4.07.

References

1. Piancastelli, L., Francia, D., & Renzi, C. Topological, geometrical and structural optimization of complex mechanical systems. *20 Congreso Internacional de Ingenieria Grafica*, 2008. 9 p.

2. You, K., Zhao, X., Zhao, S. Z., & Faisal, M. Design and optimization of a high-altitude long endurance UAV propeller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 926, no. 1, article no. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/926/1/012018.

3. Portillo-Juan, A., Saettone, S., Andersen, P., & Ferrer, E. Hydro-acoustic optimization of propellers: A review of design methods. *Applied Ocean Research*, 2024, vol. 151. 25 p. DOI: 10.1016/j.apor.2024.104158.

4. Bello-Orgaz, G., Ramirez-Atencia, C., Fradera-Gil, J., & Camacho, D. GAMPP: Genetic algorithm for UAV mission planning problems. *Intelligent Distributed Computing IX: Proceedings of the 9th International*

Symposium on Intelligent Distributed Computing–IDC'2015, 2015, pp. 167-176. DOI: 10.1007/978-3-319-25017-5_16.

5. Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, vol. 54, iss. 5, pp. 2105-2117. DOI: 10.1109/TAES.2018.2807558.

6. Ahuja, V., & Hartfield, R. Optimization of UAV designs for aerodynamic performance using genetic algorithms. *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, 2010, article no. 2759. DOI: 10.2514/6.2010-2759.

7. Boutemedjet, A., Samardžić, M., Rebhi, L., Rajić, Z., & Mouada, T. UAV aerodynamic design involving genetic algorithm and artificial neural network for wing preliminary computation. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 84, pp. 464-483. DOI: 10.1016/j.ast.2018.09.043.

8. Dinc, A. Optimization of a turboprop UAV for maximum loiter and specific power using genetic algorithm. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2016, vol. 33, iss. 3, pp. 265-273. DOI: 10.1515/tjj-2015-0030.

9. Malim, A., Mourousias, N., Marinus, B. G., & De Troyer, T. Structural design of a large-scale 3D-printed high-altitude propeller: methodology and experimental validation. *Aerospace*, 2023, vol. 10, iss. 3. 21 p. DOI: 10.3390/aerospace10030256.

10. Wu, J., Sigmund, O., & Groen, J. P. Topology optimization of multi-scale structures: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, vol. 63, pp. 1455-1480. DOI: 10.1007/s00158-021-02881-8.

11. Sigmund, O., & Maute, K. Topology optimization approaches: A comparative review. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2013, vol. 48, iss. 6, pp. 1031-1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6.

12. 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.

13. Yilmaz, S., Erdem, D., & Kavsoglu, M. S. Performance of a ducted propeller designed for UAV applications at zero angle of attack flight: An experimental study. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 45, pp. 376-386. DOI: 10.1016/j.ast.2015.06.005.

14. Malgoezar, A. M., Vieira, A., Snellen, M., Simons, D. G., Veldhuis, L. L. Experimental characterization of noise radiation from a ducted propeller of an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Aeroacoustics*, 2019, vol. 18, iss. 4-5, pp. 372-391. DOI: 10.1177/1475472X19852952.

15. Kovtun, A. A., Melchenko, A. O., Balalaieva, K. V., Usenko, V. Yu. Akustychne vyprominiuvannia zakapotovanoho hvynta BPLA [Acoustic radiation of a ducted UAV propeller]. *Aerospace technic and technology*, 2024, no. 4(196), pp. 58-63. DOI: 10.32620/aktt.2024.4.07.

Надійшла до редакції 15.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A DUCTED PROPELLER OF UAV

*Anton Balalaiev, Kateryna Balalaieva, Grygoriy Golembiyevskyy,
Andrii Melchenko, Vyacheslav Usenko*

The subject of this study is the minimization of the duct mass for a ducted propeller of UAV. **The object** of this study is a two-bladed ducted quadcopter propeller. The peripheral diameter of the propeller is 128 mm, and the hood is 2 mm thick. The propeller rotates along with the duct. **The purpose of this study** is to analyze the design of the ducted propeller of UAV in terms of reducing the mass by applying topological optimization methods. The following tasks were performed to achieve the set goal: the stress-strain state of the ducted propeller of UAV was calculated under static strength conditions; topological optimization of the ducted propeller of UAV was performed; and a model of the ducted propeller was built considering topological optimization. The study used numerical experiment **and topological optimization methods**. The calculations were performed in the Ansys Workbench software environment; the Geometry, Static Structural, and Structural Optimization modules were used for the selected problem. **Results:** The results of the analysis of the design of the ducted propeller of UAV are presented to reduce the mass by applying topological optimization methods. Based on the results of calculating the stress-strain state of the UAV ducted propeller under static strength conditions, the hood was topologically optimized. The results of topological optimization made it possible to lighten the duct design by adding holes in the form of oval - round windows in the lower part of the duct and changing the shape of the wavy upper edge of the duct. Based on the topological optimization results, an updated model of the ducted propeller of UAV was built. The ducted propeller has a less weight of 20.23 % and has the necessary safety margin. These studies assess the aerodynamic characteristics of a ducted propeller with an updated duct shape. **Scientific novelty and practical significance of the work:** new data were obtained on the analysis of the design of the ducted propeller of UAV by applying topological optimization. The obtained results can be used in the development of promising UAV propellers.

Keywords: propeller; duct; UAV; topological optimization; numerical modeling; static strength; stress-strain state; mass.

Балаласв Антон Валерійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Балаласва Катерина Вікторівна – д-р техн. наук, проф., проф. каф. авіаційних двигунів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Голембієвський Григорій Григорійович – старш. викл. каф. прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Мельченко Андрій Олегович – асп., каф. авіаційних двигунів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

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

Anton Balalaiev – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State non-profit enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: avbalalaiev@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3603-4512.

Kateryna Balalaieva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Aviation Engine, State non-profit enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: kiki_ua@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6495-3263.

Grygoriy Golembiyevskyy – Senior Lecturer at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering of the Aerospace Faculty, State non-profit enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: golembievsky.g@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2092-9637.

Andrii Melchenko – PhD Student of the Department of Aircraft Engines, State non-profit enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: 3960950@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0009-0005-2639-5615.

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