

УДК 629.7.035.7

doi: 10.32620/aktt.2025.4.03

І. Г. БАБІЧЕВ

Державний університет "Київський авіаційний інститут", Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТАНДЕМНОГО ВЕНТИЛЯТОРА З ОБ'ЄДНУЮЧОЮ ТОРОЇДАЛЬНО-СПІРАЛЬНОЮ ЗАКІНЦІВКОЮ ЛОПАТЕЙ В ОБМЕЖЕНОМУ ПРОСТОРИ

Робота тягового вентилятора в обмеженому просторі стає все більш актуальною проблемою, виходячи з мініатюризації літальних апаратів і, як наслідок, розширенням їх функціональних можливостей. Але відразу виникають традиційні для малорозмірних БПЛА проблеми: акустичний шум, мала тяга, як наслідок, мала вантажопідйомність. А вплив землі, стінки і стелі створює додаткову проблему: низька стійкість і керованість при підльоті до перешкоди. Проблемою також є аеродинамічні характеристики лопатей, особливо втулкові втрати і кінцеві перетікання. Тобто при підльоті до перешкоди по тиску та форми вхідного і вихідного потоків зазнають значних змін і впливають на основні характеристики літального апарата. Погіршення аеродинамічних характеристик лопатей сприяє збільшенню шуму, всмоктуванню пилу при роботі в зоні впливу землі, перекиданню літального апарата при підльоті до стінки за рахунок збільшення бокової сили тощо. Це суттєво обмежує функціональні можливості малорозмірного БПЛА. Якраз ті, заради яких вони і створювалися. При проведенні заходів, спрямованих на покращення тактико-технічних характеристик малорозмірних БПЛА необхідно обов'язково враховувати і їх вартість, виходячи з масовості їх застосування. Усі ці проблеми можуть бути вирішені двома шляхами – застосуванням тороїдальних вентиляторів, технологія виготовлення яких є доволі складною проблемою, або ж традиційних лопатей з об'єднуючою тороїдально-спіральною закінцівкою. Останній варіант виглядає найбільш привабливим з точки зору використання раніше напрацьованих результатів. Окрім того, безперечний інтерес викликає взаємодія вентилятора зі стінкою і стелею одночасно. Ці проблеми практично не розглядаються більшістю дослідників, хоча проблеми керованості і стійкості малорозмірних БПЛА в цих умовах досить вагомі. І якщо для традиційних вентиляторів з класичною аеродинамікою лопатей питання взаємодії вентилятора зі стінкою, землею, стелею розглядаються досить широко, то щодо тороїдальних вентиляторів, тим паче для тандемних чи тандемних з тороїдально-спіральною закінцівкою таких робіт практично немає. Особливу цікавість викликає робота відкритого ротора в системі квадрокоптера, коли при високих обертах ротора з тандемними лопатями тороїдально-спіральна об'єднуюча закінцівка лопатей практично відіграє роль своєрідного каналу (ефект каналного вентилятора).

Ключові слова: закінцівка; дворядні лопаті; вентилятор; тороїдальний вентилятор; геометричні параметри; тяга вентилятора; БПЛА.

Вступ

Загальновизнаний факт того, що тяга каналного вентилятора зменшується зі зменшенням висоти (ефект землі). Тяга каналу зменшується, а тяга лопатей-збільшується.

В роботі [1] показано, що тяга лопатей збільшується на 28%, а тяга каналу зменшується на 41,1% (висота R), що призводить до зменшення загальної тяги на 12,5%. Тобто у будь-якому випадку ефективність каналного вентилятора зменшується в зоні впливу землі (при висотах $h=0,25\div0,75 R$).

Канальні вентилятори зацікавили виробників виходячи з їх високого потенціалу (можливостей), широкого застосування як у цивільних, так і у військових місіях, надаючи безперечні переваги на полі бою, зберігаючи людські ресурси [2, 3].

У порівнянні із ізольованим (відкритим) вентилятором наявність каналу (повітропроводу) може істотно послабити стискування сліду вентилятора і дає можливість літати ефективно з високою безпекою, компактною структурою і низьким рівнем шуму.

Однак, виходячи з того, що можливості каналних вентиляторів, практично вичерпані, особливо з точки зору швидкісних характеристик, багато хто з дослідників починає звертати увагу на інші конструкції, зокрема на тандемні вентилятори (гвинти), які знайшли свою нішу, зокрема, в морських рушіях.

Застосування тандемних лопатей ротора дозволяє на фоні значного зростання тяги (до 40%) зберегти масові, геометричні характеристики із збереженням задовільного рівня шуму та технологічності виготовлення. Особливо це стосується тандемних



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

вентиляторів із тороїдально-спіральною закінцівкою лопатей, що значно зменшує кінцеві втрати.

В тороїдально-спіральному вентиляторі кінчик однієї лопаті загинається зворотно в кінчик лопаті другого ряду. Така конструкція дозволяє звести до мінімуму лобовий опір закручених повітряних вихорів, створюваних на кінчиках лопатей і підвищує загальну жорсткість вентилятора. При цьому вихори, створювані вентилятором, розподіляються по всій лопаті, а не тільки на її кінці. Потік повітря швидко розсіюється в атмосфері, а вихор не розповсюджується далеко, тому його важко почути. При цьому шум знижується в ключовому діапазоні 100Гц- 5кГц (до якого особливо чутливе людське вухо). Тобто подразливе дзижчання перетворюється в звичайний шелест.

Тандемний вентилятор з тороїдально-спіральною закінцівкою не тільки тихіший при заданому рівні тяги, ніж стандартний, а і дає більшу тягу при заданому рівні потужності.

На відміну від інших подібних вентиляторів (наприклад, наведеному в роботі [4]) запропонована конструкція не має основного недоліку тороїдальних вентиляторів – складність у виготовленні. Вона набагато простіша і технологічніша.

До того ж, необхідно врахувати, що у нашому випадку це тандемний, дворядний вентилятор, в якому набагато легше регулювати втрати в кореневій частині лопаті, ніж у лопаті, виконаній у класичному варіанті.

Якщо такий вентилятор розташовується в каналі (каналний тандемний вентилятор), то тяга каналу, як і загальна тяга, зростає за рахунок «косого» обдуву стінок каналу з високою швидкістю. Шум при цьому зменшується за рахунок перерозподілу спектру звукових частот в бік височастотних коливань з меншою амплітудою (інтенсивністю).

Задачі дослідження

Розглянемо попередні результати, випробування вентилятора (рис.1), отримані на спеціально створеній експериментальній установці.

Ефект землі обмежує вихідний потік літального апарата з каналним вентилятором, змушуючи його розвертатися поперечно з утворенням небажаних наземних вихорів. Для тандемних вентиляторів ефект землі менш яскраво виражений і досягає максимуму в районі $h=0,25\div0,35R$. Тобто в цьому районі тяга вентилятора і крутний момент досягають максимуму.

Це істотно відрізняє їх від однолопатевих вентиляторів, де ефект землі більш яскраво виражений, досягає максимуму, і настає при $h=0,5\div0,75R$.

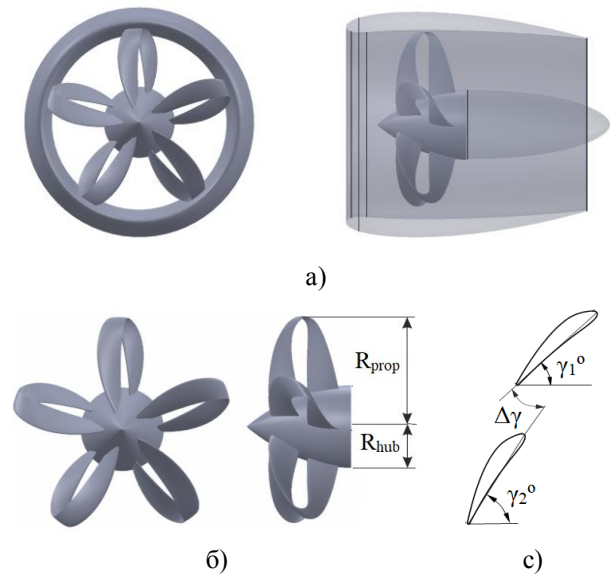


Рис. 1. Вентилятор з тандемними лопатями, об'єднаними тороїдально-спіральною закінцівкою: а – загальний вид вентилятора; б – ротор вентилятора $R_{prop}=50\text{mm}$, $R_{hub}=18\text{mm}$; в – схема розташування профілів в перерізах $(0,2R-0,8R)$ вздовж висоти лопаті; с – кут взаємного розташування профілю $\Delta\gamma$

Це пояснюється впливом «косого» витоку потоку з області закінцівок що, розширюючи конусність потоку, «висмоктує» повітря із зони високого тиску в центрі обертального диску в зону низького тиску на периферії лопатей. Особливо яскраво цей ефект проявляється в пристінковій зоні для високообертального ротора ($n>4000$ об/хв).

Керованість (як і зменшення темпу зростання тяги) в умовах роботи при спільному впливі землі і стінки більша за рахунок взаємодії радіального потоку вздовж стінки та поперечного потоку під площиною обертання вентилятора і «косої» завіси від тороїдально-спіральної закінцівки (рис.2), яка діє під кутом закрутки на вихідний потік.

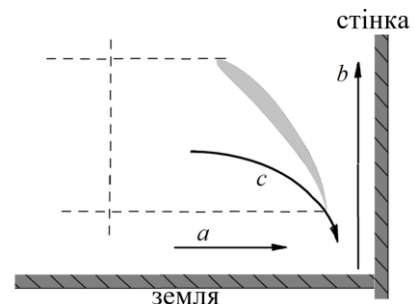


Рис.2. Формування вихідного повітряного потоку в тандемному вентиляторі з тороїдально-спіральною об'єднуючою закінцівкою лопатей при роботі над землею: а – поперечний потік; б – радіальний потік; с – «косий» потік («коса завіса»)

При цьому зменшується приземне вихороутворення і зберігається структура потоку.

Якщо ж тандемний вентилятор з тороїдально-спіральними закінцівками працює в каналі, то загальна тяга з висотою зменшується менш інтенсивно за рахунок менш інтенсивного зменшення тяги каналу. Знову ж таки за рахунок “косого” обдування каналу.

Коли БПЛА наближаються до землі від $5R$ до $0,25R$ тяга ротора збільшується експоненціально з відстанню до землі. Якщо ротор працює в каналі, то тяга каналу, яка у цьому випадку превалює над тягою ротора, збільшується більш інтенсивно приблизно на 30% за рахунок косого обдування стінки каналу. Виходячи з того, що при роботі близько до землі основний потік повітря проходить через каналний вентилятор на кінцях лопаті, тороїдально-спіральна закінцівка сприяє збільшенню масової витрати повітря і підвищує стійкість всередині поля потоку і підвищує аеродинамічні характеристики лопаті. Тяга на кінчику лопаті збільшується приблизно на 28% (до $0,5R$) з однолопатеvim вентилятором [5]. У випадку з тандемним вентилятором цей приріст ще більший за рахунок тороїдально-спіральної закінцівки. Зберігаючи конусність вихідного потоку (зменшуючи його розсіюваність) це підвищує стійкість і керованість літального апарата.

Практично такі результати отримані при роботі “вільного” (не закапотованого тандемного) вентилятора, де тороїдально-спіральна закінцівка (особливо для високообертового ротора $n > 10000$ об/хв) відіграє роль своєрідного каналу, що стабілізує форму вихідного потоку і підвищує керованість. Коефіцієнт крутного моменту при цьому збільшується експоненціально з висотою, ще вказує на те, що робоче навантаження на ротор поблизу землі значно збільшується.

Але при усьому цьому необхідно враховувати факт того, що при інтенсивному вихороутворенні із землі піднімається значна кількість пилу, що всмоктується вентилятором. При роботі ротора з тандемним вентилятором і тороїдально-спіральною закінцівкою лопатей цей ефект дещо менший за рахунок косої завіси, яка сприяє менш інтенсивно покидати пилу конус вихідного потоку.

При роботі вентилятора в зоні стелі необхідно звернути увагу на те, що вплив стелі для тандемних відкритих вентиляторів, на відміну від каналних вентиляторів, більший за рахунок бокового надходження повітря в міжлопатеви простір, яке має значний вплив на низьких частотах обертання ротора (до 4000 об/хв).

При спільному впливі стелі і стінки цей ефект ще збільшується, в той же час сприяючи більш м'якому підходу літального апарата до стінки, за-

побігаючи різкому контакту з нею (рис.3). Тому необхідно приділяти підвищену увагу роботі контролера польоту у цих умовах, або ж застосувати каналний (закапотований) тандемний вентилятор.

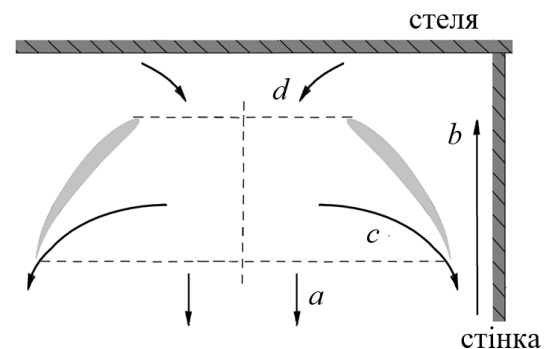


Рис. 3. Формування вихідного повітряного потоку в тандемному вентиляторі з тороїдально-спіральною об'єднуючою закінцівкою лопатей під стелею:

a – вихідний потік; b – радіальний потік;
 d – потік “всмоктування”; c – “косий потік”

При експериментальних дослідженнях вентиляторів їх характеристики традиційно оцінюють безрозмірними коефіцієнтами. Зокрема, коефіцієнтами потужності C_p та тяги C_T [6] по відношенню до відносного кроку лопатей вентилятора:

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} ; \quad C_p = \frac{2\pi Q}{\rho n^2 D^5} ,$$

де T – тяга, $\rho = 1,225$ кг/м³ – густина повітря, Q – крутний момент ротора, n – частота обертання ротора, D – діаметр вентилятора.

На рис. 4 показана залежність C_p і C_T відносно h/R для дослідженого вентилятора (без впливу стінки).

Ефект стіни має незначний вплив на тягу і крутний момент кільцевого вентилятора. Загальна тяга залишається практично постійною під час підльоту безпілотної до стінки.

В ефекті стіни більш значно змінюється бокова сила і коефіцієнт тангажа.

При наближенні БПЛА до стінки коефіцієнт бокової сили експоненціально збільшується при зміні відстані від $5R$ до $0,25R$. Коефіцієнт тангажа веде себе аналогічно, змінюючись експоненціально. При цьому бокова сила на відстані $0,5R$ складає усього декілька відсотків від загальної тяги, тобто вплив мінімальний на стійкість польоту. Зміна ж моменту тангажа лопатей може викликати значні труднощі під час керування БПЛА (рис. 5).

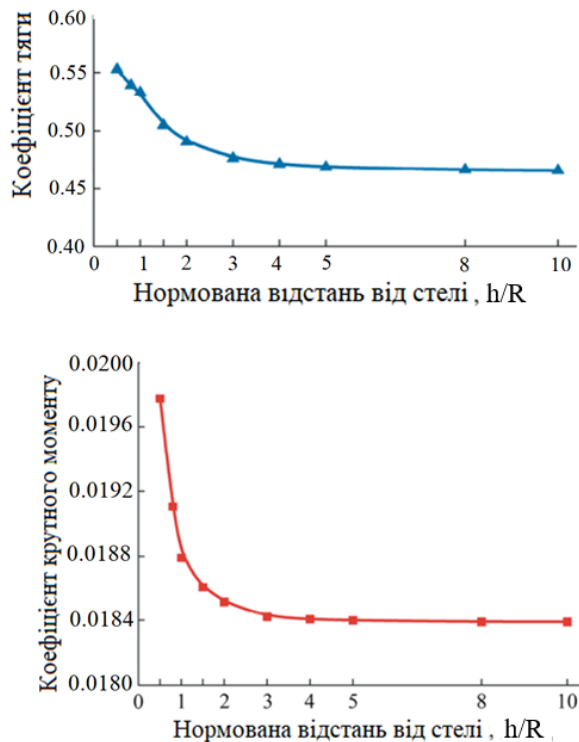


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тяги і коефіцієнта крутного моменту від нормованої відстані від стелі

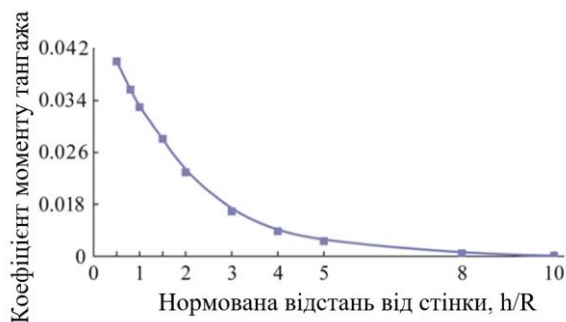


Рис. 5. Залежність коефіцієнта моменту тангажа від нормованої відстані від стінки

Під час підльоту до стіни бокова сила (ефект стінки) штовхає контур швидкості на вході, щоб відтіснити його від стіни, а на виході – навпаки, нахилиє контур до стіни (рис.), що призводить до значної асиметрії потоку. При цьому перерозподіл тисків намагається перевернути БПЛА в бік стінки (рис. 6).

У дворядному вентиляторі з тороїдально-спіральною закінцівкою ефект стінки має менший вплив завдяки “косому” обдуву конуса вихідного потоку, перешкоджаючи формуванню зони низького тиску біля стінки. Тому значний вплив на аеродинамічну стійкість вентилятора відчувається значно пізніше, на відстані $0,2 - 0,25R$ від стінки. Це дозволяє, наприклад, проводити монтажно - демонтажні

роботи на стінці за допомогою висувної штанги у більш комфортних умовах для оператора БПЛА.

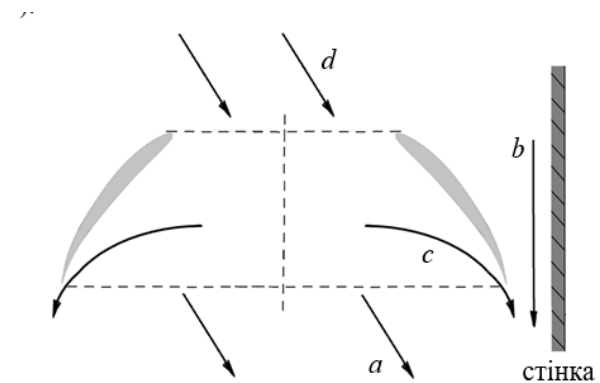


Рис. 6. Формування вихідного повітряного потоку в тандемному вентиляторі з тороїдально-спіральною об'єднуючою закінцівкою лопатей при роботі біля стінки: a – вихідний потік; b – радіальний потік; d – вхідний потік; c – “косий” потік

Результати

1. Ефект землі обмежує вихідний потік кільцевого вентилятора, розвертаючи його горизонтально, що сприяє вихорутворенню. Застосування об'єднуючої тороїдально-спіральної закінцівки в тандемному вентиляторі сприяє розповсюдженню зони високого тиску від втулки до периферії підвищуючи стійкість і керованість БПЛА. При цьому зменшення масової витрати повітря відчувається менш різко щодо тяги в порівнянні зі стандартним вентилятором, досягаючи максимуму для некапотованих вентиляторів на висоті $0,5 - 0,75R$.

2. Ефект стелі. Тяга ротора збільшується експоненціально з підняттям літального апарата. При цьому менша масова витрата повітря призводить до збільшення кута атаки лопаті, особливо в кореневій і середній частинах.

3. Ефект стінки в основному впливає на асиметрію потоку, при цьому тяга залишається практично незмінною при наближенні до стінки. Основний вплив близькості стінки має на момент тангажа та бокову силу.

Створювана бокова сила і момент тангажа сприяють перекиданню БПЛА в бік стінки, що необхідно враховувати під час планування польотів.

У цілому звичайний каналний вентилятор без впливу землі і стелі працює до відстаней відповідно в $2R$ і R . У випадку дворядного вентилятора з об'єднуючими тороїдально-спіральними закінцівками стійка робота забезпечується до $1,5R$ і $0,75R$ відповідно.

Висновки

Змінюючи взаємне розташування рядів вентиляторів (спіральність закінцівок лопатей), профілювання закінцівок, можна отримати модельний ряд тандемних вентиляторів, особливо каналних, для широкого спектра застосування, включаючи тягнучі гвинти високошвидкісних БПЛА, морських суден (особливо каналних гвинтів).

Такого ж ефекту можна досягнути за рахунок збільшення кількості лопатей, що призводить до більш чіткої організації потоку в тороїдальному каналі і формуванню циліндричного вихідного повітряного потоку.

Зі збільшенням кількості лопатей (і швидкості обертання ротора) тороїдальний стан потоку стабілізується і система стає більш стійкою. При цьому вихідний потік вентиляторів набуває також стійкої характерної циліндричної форми. Окрім того скручує потік закінцівки в тугий джгут, забезпечуючи стійкість БПЛА практично в усіх умовах польоту, особливо при бічному вітрі і роботі в обмеженому просторі.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що у нього 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 пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

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

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Gao, Y. *The Overall Design of Variable Diameter Ducted Fan in the Aircraft* [Text] / Y. Gao, Y. Xu // *Aerospace* – 2022. – Vol. 9, iss. 7. – Article No. 387. DOI: 10.3390/aerospace9070387.
2. *Numerical simulation and analysis of a ducted-fan drone hovering in confined environments* [Text] / Y. Luo, Y. He, B. Xu, & et al. // *Advances in Aerodynamics*, – 2024. – Vol. 6. – Article no. 18. DOI: 10.1186/s42774-024-00179-z.

3. *Ground Effect on a Landing Platform for an Unmanned Aerodynamic System* [Text] / B. Tardaguila, S. Claus, M. Herrero, J. Wulf, L. Nagels, & S. Verwulgen // *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems. AHFE International Conference. AHFE Open Access, AHFE International, USA, 2023.* – Vol 93. – P. 58–67. DOI: 10.54941/ahfe1003748.

4. *Разработки в МИТ винты новой формы делают любой дрон почти бесшумным* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hightech.plus/2023/02/01/razrabotannie-v-mit-vinti-novoi-formi-delayut-lyuboi-dron-pochti-besshumnim> – 2.03.2025.

5. *Numerical investigation on unsteady characteristics of ducted fans in ground effect* [Text] / Y. Luo, T. Ai, Y. He, B. Xu, Y. Qian, & Y. Zhang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2023. – Vol. 36, iss. 9. – P. 79-95. DOI: 10.1016/j.cja.2023.04.004.

6. *Parametric study of aerodynamic performance of equivalent ducted/un-ducted rotors* [Text] / T. Zhang, G. Qiao, D. A. Smith, G. N. Barakos, & A. Kusunov // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol. 117. – Article No. 106984. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106984.

References

1. Gao, Y., & Xu, Y. The Overall Design of Variable Diameter Ducted Fan in the Aircraft. *Aerospace*, 2022, vol. 9, iss. 7, article no. 387. DOI: 10.3390/aerospace9070387.
2. Luo, Y., He, Y., Xu, B., & et al. Numerical simulation and analysis of a ducted-fan drone hovering in confined environments. *Advances in Aerodynamics*, 2024, vol. 6, article no. 18. DOI: 10.1186/s42774-024-00179-z.
3. Tardaguila, B., Claus, S., Herrero, M., Wulf, J., Nagels, L., & Verwulgen, S. Ground Effect on a Landing Platform for an Unmanned Aerodynamic System. In: *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems. AHFE International Conference. AHFE Open Access, AHFE International, USA, 2023*, vol. 93, pp. 58-67. DOI: 10.54941/ahfe1003748.
4. *Razrabotki v MIT vinty novoy formi delayut lyuboy dron pochti besshumnim* [MIT Developments: New Propeller Shapes Make Any Drone Almost Silent]. Available at: <https://hightech.plus/2023/02/01/razrabotannie-v-mit-vinti-novoi-formi-delayut-lyuboi-dron-pochti-besshumnim> (accessed 2.03.2025). (in Russian).
5. Luo, Y., Ai, T., He, Y., Xu, B., Qian, Y., & Zhang, Y. Numerical investigation on unsteady characteristics of ducted fans in ground effect. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, iss. 9, pp. 79-95. DOI: 10.1016/j.cja.2023.04.004.
6. Zhang, T., Qiao, G., Smith, D. A., Barakos, G. N., & Kusunov, A. Parametric study of aerodynamic performance of equivalent ducted/un-ducted rotors. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 117, article no. 106984. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106984.

Надійшла до редакції 22.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

PECULIARITIES OF OPERATION OF A TANDEM FAN WITH A UNIFYING TOROIDAL-HELICAL BLADE TIP IN A CONFINED SPACE

Ivan Babichev

The operation of a thrust fan in a confined space is becoming an increasingly urgent problem due to the miniaturization of aircraft and, as a result, the expansion of their functionality. However, the traditional problems for small UAVs immediately arise: acoustic noise, low thrust, and, as a result, low payload. And the influence of the ground, walls, and ceiling creates an additional problem: low stability and controllability when approaching an obstacle. Another problem is the aerodynamic characteristics of the blades, especially the sleeve losses and end flows. That is, when approaching an obstacle, the pressure and shape of the inlet and outlet flows undergo significant changes and affect the basic characteristics of the aircraft. The deterioration of the aerodynamic characteristics of the blades contributes to an increase in noise, dust suction when operating in the ground impact zone, overturning of the aircraft when approaching the wall due to an increase in lateral force, etc. This significantly limits the functional capabilities of a small UAV. Exactly those for which they were created. When taking measures aimed at improving the tactical and technical characteristics of small UAVs, it is necessary to take into account their cost, based on the mass of their use. All these problems can be solved in two ways - by using toroidal fans, the manufacturing technology of which is a rather complicated problem, or by using traditional blades with a unifying toroidal-helical tip. The latter option looks the most attractive from the point of view of utilizing the previously achieved results. In addition, the interaction of the fan with the wall and ceiling at the same time is of undoubted interest. These problems are practically not considered by most researchers, although the problems of controllability and stability of small UAVs in these conditions are quite significant. And if for traditional fans with classical blade aerodynamics the issues of fan interaction with the wall, ground, and ceiling are considered quite extensively, then for toroidal fans, especially for tandem or tandem with a toroidal-helical tip, there are practically no such works. Of particular interest is the operation of an open rotor in a quadrotor system, when at high rotor speeds with tandem blades, the toroidal-helical unifying blade tip practically plays the role of a kind of channel (the effect of a ducted fan).

Keywords: blade tip; two-row blades; fan; toroidal fan; geometric parameters; fan thrust; UAV.

Бабічев Іван Геннадійович – асп. каф. авіаційних двигунів, Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна.

Ivan Babichev – PhD Student of the Department of Aviation Engines, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: i.babichev@gmail.com, ORCID: 60000-0002-2626-322.