

УДК 621.452.33:533.69

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.05

В. Ю. УСЕНКО¹, К. В. БАЛАЛАЄВА², М. М. МІТРАХОВИЧ³¹ ДП «Антонов», Київ, Україна² Національний авіаційний університет, Київ, Україна³ ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ В СПІВВІСНОМУ ГВИНТОВЕНТИЛЯТОРІ З УПРАВЛІННЯМ ПРИМЕЖОВИМ ШАРОМ

Розвиток і вдосконалення турбогвинтових двигунів є одним із важливих завдань сучасного авіаційного двигунобудування. Характеристики повітряного гвинта значно впливають на загальний ККД турбогвинтових двигунів. Важливим питанням є підвищення сили тяги гвинта або гвинтовентилятора. В даному питанні на особливу увагу заслуговують перспективні енергетичні методи збільшення підйомної сили. Енергетичні методи збільшення підйомної сили засновані на використанні додаткової енергії силової установки для поліпшення обтікання лопаті і збільшення її несучих властивостей. Мета роботи – оцінити вплив управління примежовим шаром на лопатях співвісного гвинтовентилятора на тягу. Як об'єкт дослідження обрано співвісний гвинтовентилятор. Гвинтовентилятор складається з двох рядів лопатей, перший ряд має вісім лопатей, другий – шість. Периферійний діаметр лопатей гвинтовентилятора однаковий і становить 4,5 м. Для дослідження обрано крейсерський режим роботи. Моделювання течії в співвісному гвинтовентиляторі ґрунтувалося на вирішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса, що замикалася моделлю турбулентної в'язкості SST Gamma Theta Transition. Розрахункова сітка складалася з 20 млн. комірок, тип – блокова, структурована і неструктурована з адаптацією примежового шару. В даному дослідженні обрано активний метод управління примежовим шаром. Управління примежовим шаром здійснювалося тільки на лопатях першого ряду гвинтовентилятора. В периферійній області лопаті здійснювався видув додаткової маси повітря через щілину, на відстані 70% хорди профілю. Видув тонкого струменя поблизу стінки лопаті для збільшення енергії потоку служить ефективним засобом управління відривом потоку і збільшення несучої здатності лопаті гвинтовентилятора. Аналіз моделювання течії в гвинтовентиляторі з управлінням примежовим шаром показав, що додана енергія в примежовий шар сприяє наповненню профілю швидкості в примежовому шарі, що приводить до зменшення опору і підвищення тяги гвинтовентилятора. Результати дослідження показали, що для досліджуваної схеми видування додаткової маси повітря на лопатях гвинтовентилятора можна досягти збільшення сили тяги до 100Н. Надалі планується досліджувати інші схеми управління примежовим шаром з метою підвищення сили тяги співвісного гвинтовентилятора.

Ключові слова: співвісний гвинтовентилятор; моделювання течії; управління примежовим шаром; видув повітря; реактивна тяга; чисельний експеримент.

Вступ

Розвиток і вдосконалення турбогвинтових двигунів є одним із важливих завдань сучасного авіаційного двигунобудування. Характеристики повітряного гвинта значно впливають на загальний ККД турбогвинтових двигунів. Важливим питанням є підвищення сили тяги гвинта або гвинтовентилятора. В даному питанні на особливу увагу заслуговують перспективні енергетичні методи збільшення підйомної сили. Енергетичні методи збільшення підйомної сили засновані на використанні додаткової енергії силової установки для поліпшення обтікання лопаті і збільшення її несучих властивостей. Це можуть бути комплексні системи управління примежовим шаром – вдув і відсмоктування, або окремі системи пасивного управління примежовим шаром у вигляді зміни форми лопатей або застосу-

ванням турбулізаторів, генераторів вихорів або акустичних резонаторів [1]. Однак, варто також зазначити, що якщо для осьових компресорів, крил такі системи досить досліджені, то для гвинтів і гвинтовентиляторів питання управління примежовим шаром є практично не дослідженими.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Удосконалення аеродинаміки повітряних гвинтів і гвинтовентиляторів досягається шляхом оптимізації форми лопатей, а також може бути досягнута застосуванням різних способів управління примежовим шаром.

В роботі [2] представлені результати оптимізації форми лопатей гвинта для досягнення максимальної аеродинамічної ефективності. В процесі проє-

ктування використовується змішаний підхід, в основі якого лежить метод «space mapping». В роботі [3] виконана оптимізація шестилопатевого гвинта з метою поліпшення аеродинамічних і акустичних характеристик. При вирішенні задач автор використовує комплексний метод, що дозволяє оптимізувати форму лопатей при збереженні тягових характеристик і одночасному поліпшенні акустичних і аеродинамічних характеристик.

Автор роботи [4] представив результати експериментального дослідження можливості управління турбулентним примежовим шаром крилового профілю NASA 0012 з метою поліпшення його аеродинамічних характеристик в нестисливого потоці. Управління течією здійснювалося в діапазоні кутів атаки $-12^\circ \dots 12^\circ$ шляхом застосування стаціонарного комбінованого вдування/відсмоктування повітря через дрібно перфоровані поверхні.

В роботі [5] досліджено новий спосіб пасивного управління примежовим шаром на лопатях дволопатевого гвинта. З метою усунення явища відриву примежового шару, підвищити підйомну силу на лопаті, розроблена і запатентована нова конструкція повітряного гвинта, що отримала назву дволопатевого повітряний гвинт. Ця конструкція має додаткову лопать над основною. Для зразків дволопатевого повітряного гвинтів за допомогою програми ANSYS Fluent визначені положення, в яких знижуються індуктивний опір, зменшується товщина примежового шару і підвищується підйомна сила. У лабораторних умовах виконано дослідження статичної сили тяги дволопатевого повітряного гвинта на стенді, що забезпечує вимір моментів при частоті обертання 2000...4500 1/хв. Порівняльний аналіз дволопатевого повітряного гвинта з класичним показує, що розроблена схема має більш високі характеристики.

В роботі [6] досліджується можливість поліпшення аеродинаміки гвинта за допомогою використання пасивного кінцевого струменя. У роботі використовуються порожнисті лопаті гвинта з прорізами для всмоктування потоку біля кореня і викиду на периферії. Відцентрове прискорення потоку, що створюється всередині лопаті обертючим рухом гвинта, використовується для переміщення значної кількості імпульсу потоку від самої внутрішньої частини лопаті до периферії. Дана технологія дуже приваблива, оскільки не вимагає додаткових зовнішніх джерел енергії для приведення потоку в дію. Випробування виконано за допомогою фізичного експерименту для гвинта, встановленого під нульовим кутом атаки. Результати показують, що застосування управління примежовим шаром значно знижує інтенсивність вихрового обтікання на кінці лопаті.

В роботі [7] представлена нова конструкція управління потоком гвинта з метою недопущання відриву примежового шару для поліпшення характеристик гвинта в умовах низького числа Рейнольдса або при роботі з високим навантаженням. Конструкція включає в себе серію всмоктувальних форсунок генератора вихорів, що перетинають поверхню всмоктування гвинта. Метою цього методу управління потоком струменевої продувки є зменшення опору гвинта в супутньому струмені і збільшення підйомної сили, що призводить до підвищення ефективності гвинта.

Таким чином, літературний огляд показав, що використання управління примежовим шаром на лопатях гвинта дозволяє поліпшити характеристики гвинта. Однак залишаються не до кінця вивчені питання, пов'язані з дослідженням аеродинамічних характеристик співвісних гвинтовентиляторів з управлінням примежовим шаром. З іншого боку, співвісні гвинтовентилятори мають ряд переваг в порівнянні з однорядними гвинтами. Таким чином, дослідження аеродинамічних характеристик співвісних гвинтовентиляторів з управлінням примежовим шаром є актуальним.

Мета роботи – оцінити вплив управління примежовим шаром на лопатях співвісного гвинтовентилятора на їх тягу.

Постановка задачі дослідження

Як об'єкт дослідження обрано співвісний гвинтовентилятор. Гвинтовентилятор складається з двох рядів лопаткових вінців, перший ряд має вісім лопатей, другий - шість. Периферійний діаметр лопаткових вінців гвинтовентилятора однаковий і становить 4,5 м. Для дослідження обрано крейсерський режим роботи.

В якості методу досліджень автори зупинилися на чисельному експерименті. Тестові завдання представлені в роботі [8]. Моделювання течії в співвісному гвинтовентиляторі ґрунтувалося на вирішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса, що замикалася моделлю турбулентної в'язкості SST Gamma Theta Transition. Розрахункова сітка складалася з 20 млн. комірок, тип – блокова, структурована і неструктурована з адаптацією примежового шару.

На рис. 1 представлена твердотільна модель досліджуваного співвісного гвинтовентилятора.

В даному дослідженні обрано активний метод управління примежовим шаром. Управління примежовим шаром здійснювалося тільки на лопатях першого ряду гвинтовентилятора. В периферійній області лопаті здійснювався видув додаткової маси повітря через щілину, на відстані 70 % хорди профілю.



Рис. 1. Твердотільна модель співвісного гвинтовентилятора

На рис. 2 представлений фрагмент твердотільної моделі лопаті співвісного гвинтовентилятора зі спеціальною щілиною для видування.



Рис. 2. Фрагмент твердотільної моделі лопаті співвісного гвинтовентилятора зі спеціальною щілиною для видування

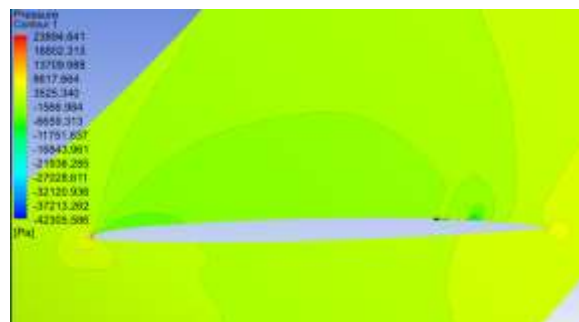
На рис. 3 представлена схема здійснення видування додаткової маси повітря для управління примежовим шаром.



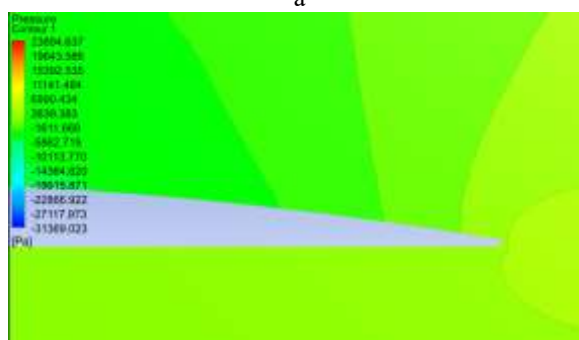
Рис. 3. Схема здійснення видування додаткової маси повітря на лопаті

Аналіз результатів досліджень

В результаті моделювання течії отримані поля тиску. Для можливості якісно порівняти картину обтікання в роботі моделювалася течія в гвинтовентиляторі з управлінням примежовим шаром і без управління примежовим шаром. На рис. 4 представлені поля тисків для досліджуваних гвинтовентиляторів.



а



б

Рис.4. Поле тиску в перерізі лопаті першого ряду гвинтовентилятора:

а – гвинтовентилятор з управлінням примежовим шаром; б – гвинтовентилятор без управління примежовим шаром

Для детального вивчення зміни картини обтікання при наявності видування додаткової маси повітря через щілину в лопаті гвинтовентилятора на рис. 5 представлено фрагмент поля тиску лопаті з управлінням примежовим шаром в області видування.



Рис. 5. Фрагмент поля тиску лопаті з управлінням примежовим шаром в області видування

Можна відзначити, що наявність активного управління примезовим шаром сприяє перебудові картини обтікання навколо лопаті гвинтовентилятора. Завдяки видуванню додаткової маси повітря в область примезового шару відбувається зміна характеру обтікання навколо лопаті гвинтовентилятора. При активному управлінні примезовим шаром струмів високої швидкості видувається за дотичною до стінки лопаті, при цьому відбувається передача енергії потоку в примезовий шар. Додана енергія в примезовий шар сприяє наповненню профілю швидкості в примезовому шарі, що приводить до зменшення опору і підвищення тяги гвинтовентилятора. Результати дослідження показали, що для досліджуваної схеми видування додаткової маси повітря на лопатях гвинтовентилятора можна досягти збільшення сили тяги до 100 Н.

Надалі планується досліджувати інші схеми управління примезовим шаром з метою підвищення сили тяги співвісного гвинтовентилятора.

Висновки

Видув тонкого струменя поблизу стінки лопаті для збільшення енергії потоку служить ефективним засобом управління відривом потоку і збільшення несучої здатності лопаті гвинтовентилятора. Аналіз моделювання течії в гвинтовентиляторі з управлінням примезовим шаром показав, що додана енергія в примезовий шар сприяє наповненню профілю швидкості в примезовому шарі, що приводить до зменшення опору і підвищення тяги гвинтовентилятора.

Результати дослідження показали, що для досліджуваної схеми видування додаткової маси повітря на лопатях гвинтовентилятора можна досягти збільшення сили тяги до 100 Н.

Надалі планується досліджувати інші схеми управління примезовим шаром з метою підвищення сили тяги співвісного гвинтовентилятора.

Література

1. Петров, А. В. Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла [Текст] / А. В. Петров. – М. : Физматлит, 2011. – 404 с.
2. Blade shape optimization of an aircraft propeller using space mapping surrogates [Text] / U. T. Toman, A.-K. S.O. Hassan, F. M. Owis [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 11, Iss. 7. – 16 p. DOI: 10.1177/1687814019865071.
3. Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades [Text] / Peixun Yu, Jiahui Peng, Junqiang Bai [et al.] // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2020. – Vol. 33, Iss. 3. – P. 826-839.

4. Корнилов, В. И. Управление турбулентным пограничным слоем крыла путем комбинированного вдува/отсоса [Текст] / В. И. Корнилов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 163-176.

5. Эрдэнэбат, Т.-О. Новый способ увеличения тяги воздушного винта путем применения дополнительной несущей поверхности [Текст] / Т.-О. Эрдэнэбат, Б. Эрдэнэбат, Д. Ганбат // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2019. – № 12. – С. 87-93. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-12-87-93.

6. Aerodynamics of an Aircraft Propeller Model with Passive Tip Jet [Text] / S. Vedamanickam, D. Ragni, G. de Oliveira [et al.] // *Journal of Aircraft*. – 2018. – № 55(4). – P. 1276-1286. DOI: 10.2514/1.C034588.

7. Bellcock, A. C. Self-aspirated vortex generator jet application for propeller boundary layer separation suppression [Text] / A. C. Bellcock // *Thesis*. – Oklahoma Christian University, Edmond, Oklahoma, 2016. – 105 p.

8. Усенко, В. Ю. Влияние зазора между рядами соосового воздушного винта на тягу [Текст] / В. Ю. Усенко, К. В. Дорошенко, М. В. Хиженяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – №7(167). – С.19-23. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.03.

References

1. Petrov, A.V. *Jenergeticheskie metody uvelichenija pod'emnoj sily kryla* [Energetic methods for increasing wing lift]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 404 p.
2. Toman, U. T., Hassan, A.-K. S.O., Owis, F. M., Mohamed, A. S.A. Blade shape optimization of an aircraft propeller using space mapping surrogates. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11, iss. 7. 16 p. DOI: 10.1177/1687814019865071.
3. Yu, Peixun., Jiahui, Peng., Junqiang, Bai., Xia, Han., Xiang, Song. Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, vol. 33, iss. 3, pp. 826-839.
4. Kornilov, V. I. *Upravlenie turbulentyim pogranichnym sloem kryla putem kombinirovannogo vduva/otosa* [Control of the turbulent boundary layer of the wing by combined blowing / deflation]. *Teplofizika i aeromehanika*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 163-176.
5. Jerdjenjebat, T.-O., Jerdjenjebat, B., Ganbat, D. *Novyj sposob uvelichenija tjagi vozdušnogo vinta putem primenenija dopolnitel'noj nesushhej poverhnosti* [A new way to increase the thrust of the propeller by using an additional bearing surface]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2019, no. 12, pp. 87-93. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-12-87-93.
6. Vedamanickam, S., Ragni, D., Oliveira, G., Veldhuis, L. Aerodynamics of an Aircraft Propeller Model with Passive Tip Jet. *Journal of Aircraft*, 2018, no 55(4), pp. 1276-1286. DOI: 10.2514/1.C034588.
7. Bellcock, A. C. *Self-aspirated vortex generator jet application for propeller boundary layer separation suppression*. Thesis, Oklahoma Christian University, Edmond, Oklahoma, 2016. 105 p.

8. Usenko, V. Yu., Doroshenko, K. V., Hy`zhnyak, M. V. Vplyv zozoru mizh ryadamy` spivvisnogo pov-ityryanogo gvy`nta na tyagu [Effect of the clearance between rows of coaxial propfan on thrust]. *Aviatsijno-*

kosmichna texnika i texnologiya – Aerospace technic and technology, 2020, no. 7(167), pp. 19-23. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.03.

Надійшла до редакції 31.05.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СООСНОМ ВИНТОВЕНТИЛЯТОРЕ С УПРАВЛЕНИЕМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

В. Ю. Усенко, Е. В. Балалаева, М. М. Митрахович

Развитие и совершенствование турбовинтовых двигателей является одной из важных задач современного авиационного двигателестроения. Характеристики воздушного винта значительно влияют на общий КПД турбовинтовых двигателей. Важным вопросом является повышение силы тяги винта или винтовентилятора. В данном вопросе особое внимания заслуживают перспективные энергетические методы увеличения подъемной силы. Энергетические методы увеличения подъемной силы основаны на использовании дополнительной энергии силовой установки для улучшения обтекания лопасти и увеличение ее несущих свойств. Цель работы - оценить влияние управления пограничным слоем на лопастях соосного гвинтовентилятора на тягу. В качестве объекта исследования выбран соосный винтовентилятор. Винтовентилятор состоит из двух рядов лопаточных венцов, первый ряд имеет восемь лопастей, второй - шесть. Периферийное диаметр лопаточных венцов гвинтовентилятора одинаков и составляет 4,5 м. Для исследования выбран крейсерский режим работы. Моделирование течения в соосном винтовентиляторе основывалось на решении системы уравнений Навье-Стокса, которая замыкалась моделью турбулентной вязкости SST Gamma Theta Transition. Расчетная сетка состояла из 20 млн. ячеек, тип - блочная, структурированная и неструктурированная с адаптацией пограничного слоя. В данном исследовании был выбран активный метод управления пограничным слоем. Управление пограничным слоем осуществлялось только на лопастях первого ряда винтовентилятора. В периферийной области лопасти осуществлялся выдув дополнительной массы воздуха через щель, на расстоянии 70 % хорды профиля. Выдув тонкой струи вблизи стенки лопасти для увеличения энергии потока служит эффективным средством управления отрывом потока и увеличения несущей способности лопасти винтовентилятора. Анализ моделирования течения в винтовентиляторе с управлением пограничным слоем показал, что добавление энергии в пограничный слой способствует наполнению профиля скорости в пограничном слое, приводит к уменьшению сопротивления и повышению тяги винтовентилятора. Результаты исследования показали, что для исследуемой схемы выдувания дополнительной массы воздуха на лопастях винтовентилятора можно добиться увеличения силы тяги до 100 Н. В дальнейшем планируется исследовать другие схемы управления пограничным слоем с целью повышения силы тяги соосного винтовентилятора.

Ключевые слова: соосный винтовентилятор; моделирование течения; управление пограничным слоем; выдув воздуха; реактивная тяга; численный эксперимент.

FLOW SIMULATION IN A COAXIAL FAN WITH BOUNDARY LAYER CONTROL

V. Usenko, K. Balalaieva, M. Mitrakhovich

The development and improvement of turboprop engines are one of the important tasks of modern aircraft engine building. Propeller performance significantly affects the overall efficiency of turboprop engines. An important issue is to increase the thrust of the propeller or propfan. In this matter, promising energy methods for increasing lift deserve special attention. Energy methods for increasing the lift force are based on the use of additional energy from the power plant to improve the flow around the blade and increase its bearing properties. The purpose of this work is to assess the influence of the boundary layer control on the blades of a coaxial propfan on the thrust. A coaxial propfan was chosen as the object of research. The rotor fan consists of two rows of blades, the first row has eight blades, the second - six. The peripheral diameter of the blades of the propfan is the same and amounts to 4.5 m. The cruise mode of operation was selected for the study. Modeling the flow in a coaxial propfan was based on the solution of the Navier-Stokes system of equations, which was closed by the SST Gamma Theta Transition model of turbulent viscosity. The computational grid consisted of 20 million cells, type-block, structured and unstructured with an adaptation of the boundary layer. In this study, an active boundary layer control method was chosen. The boundary layer was controlled only on the blades of the first row of the propfan. In the peripheral region of the blade, an additional mass of air was blown out through the slot, at a distance of 70 % of the profile chord. Blowing out a thin jet near the blade wall to increase the flow energy serves as an effective means of controlling the flow separation and increasing the bearing capacity of the propfan blade. Analysis of the simulation of the flow in a propfan with control of the boundary layer showed that the addition of energy to the boundary layer contributes to the filling of the velocity profile in the boundary layer, leads to a decrease in resistance and an increase in the thrust

of the propfan. The results of the study showed that for the studied scheme of blowing out an additional mass of air on the propeller blades, it is possible to increase the thrust force up to 100 N. In the future, it is planned to investigate other schemes for controlling the boundary layer to increase the thrust of the coaxial propfan.

Keywords: coaxial propfan; flow modeling; boundary layer control; air blowing; thrust; numerical experiment.

Усенко Вячеслав Юрійович – канд. техн. наук, начальник відділу силових установок ДП «Антонов», Київ, Україна.

Балалаєва Катерина Вікторівна – д-р техн. наук, доцент, проф. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Мітрахович Михайло Михайлович – д-р техн. наук, проф., заст. директора ДП «Івченко- Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Vjacheslav Usenko – Candidate of Technical Sciences, State enterprise “Antonov”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: uvy1758@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4794-9294,
<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=NiFo09gAAAAJ>

Kateryna Balalaieva – Doctor of Technical Sciences, Professor of Dept. of aviation engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: Kiki_ua@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6495-3263, Scopus Author ID: 57190439468,
<https://scholar.google.com/citations?user=D5hIt0wAAAAJ&hl=ru>

Mykhailo Mitrakhovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director SE «Ivchenko-Progress», Zaporozhe, Ukraine,
e-mail: mmma777@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7656-1371,
<https://scholar.google.com.ua/citations?user=HsALWqQAAAAJ&hl=uk>