

УДК 621.452.322.02:532.517.4:519.6

doi: 10.32620/aktt.2024.4sup1.04

А. А. ДУЛЄПОВ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ У СТУПЕНІ ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА

Предметом дослідження є робочий процес осьового вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна. **Об'єктом** дослідження виступає робоче колесо вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна. **Метою** роботи є отримання залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **задачі**: провести моделювання течії у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна; оцінити візуалізацію ліній току робочого тіла при дослідженні течії для визначеного діапазону частот обертання. Під час дослідження течії у ступені вентилятора застосовано **метод** числового експерименту. Моделювання течії проводилося шляхом вирішення системи рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST, в програмного середовищі ANSYS Student. Для моделювання було створено розрахункову сітку з адаптацією примежового шару, з кількістю елементів 1199803 шт., вузлів – 331685 шт. В роботі представлені результати моделювання течії у ступені вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна. **Результати**: Отримана серія витратних характеристик для діапазону відносних частот обертання від 70% до 100%. Дослідження показали, що найбільше значення ступеня підвищення тиску було зафіксовано при відносній частоті обертання 100% - 1,45; найменше значення при 85% - 1,21. Проведено оцінку візуалізацій ліній току у міжлопатковому каналі робочого колеса вентилятора. При різній частоті обертання та однаковій витраті повітря обтікання в робочому колесі вентилятора має різний характер. Частота обертання суттєво впливає на інтенсивність та локацію вихороутворень. Із розглянутих варіантів найменша інтенсивність вихороутворень спостерігається при роботі на відносній частоті обертання 70%. **Наукова новизна та практична значимість** полягає в тому, що методом числового експерименту отримані нові дані щодо витратної характеристики робочого колеса осьового вентилятора двоконтурного турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності, а результати дозволили сформулювати вихідні дані для подальшого дослідження щодо покращення характеристик вентилятора.

Ключові слова: ступінь підвищення тиску; масова витрата повітря; газотурбінний двигун; турбореактивний двоконтурний двигун; вентилятор; робоче колесо; лопатка; примежовий шар; модель турбулентної в'язкості; числове моделювання.

Вступ

Числове моделювання процесів, що протікають в складних системах, виконується з метою детального дослідження характеристик, знаходження нових пояснень та формулювання теорій, що з заданою точністю описують та пояснюють вже відомі поняття та явища. Простота та вседоступність методу числового експерименту дозволяє досліднику за браку часу та необхідного обладнання отримати важливі результати, які дозволять охарактеризувати математичну модель, підтвердити або спростувати її істинність, валідувати її для подальших досліджень. Важливо пам'ятати, що числовий експеримент має відображати правдиві та фізично обґрунтовані процеси й параметри, які співвідносяться з результатами фізичного експерименту.

Класична методологія науки виокремлювала два рівні наукового знання: теоретичне та емпіричне. Сучасна методологія на перше місце виводить синергетичний рівень, який є своєрідним синтезом двох

класичних рівнів та чудово пасує для застосування у дослідженнях газодинамічних процесів течії в силових установках авіаційної техніки. Синергетика дозволяє досліджувати турбореактивний двоконтурний двигун як математичну модель з усіма притаманними йому ознаками нерівномірності потоку робочого тіла, множинності варіантів розвитку подій під час передачі енергії у разі виникнення обертових зривів або запирання, забезпечення газодинамічної стійкості роботи ступеня вентилятора за появи ознак біфуркаційності експлуатації при роботі на неусталених режимах, а також задля розрахунку залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря для будь-якого ступеня чи робочого колеса на різних режимах роботи, що є дуже новаторською та актуальною задачею.

Всебічне дослідження газотурбінного двигуна передбачає моніторинг ряду параметрів, їх вплив на навколишнє середовище та оцінку енергетичної, ексергетичної та екологічної характеристик комплексу.

ксного аналізу. Як висновок в результаті дослідження надаються рекомендації щодо оптимізації того чи іншого ступеня для підвищення продуктивності силової установки в цілому [1].

Залучення додаткових важелів чи механізмів зі спектру наявних в арсеналі двигунобудівника для удосконалення характеристик ступеня вентилятора дуже часто передбачає роботу з енергією потоку. Числове моделювання є головним методом, який дозволяє в стислі терміни якісно та кількісно оцінити ефективність такого підходу, зробити висновки на рахунок наявності переваг та недоліків, покращити загальний коефіцієнт корисної дії або хоча б не погіршити його [2].

Числовий експеримент дозволяє кількісно виражати дію будь-якого чинника та подразника, що вивчається, з метою його впливу на систему в цілому. Це дозволяє уникнути повномасштабного фізичного експерименту, вірно сконструювати блоки (наприклад, лопатку вентилятора або робоче колесо компресора) та правильно організувати процес течії в ядрі потоку на необхідних режимах роботи [3].

Проблема підвищення ефективності газотурбінного двигуна передбачає розгляд можливості доопрацювання нині наявних конструктивів ступеню вентилятора. Дослідженню течії у вентиляторах та компресорах газотурбінних двигунів присвячено багато наукових робіт [4-7].

В роботі [4] авторами було використано метод числового експерименту, що дав змогу дослідити удосконалення параметрів газотурбінного двигуна (зменшення інфрачервоного випромінювання, питомої витрати палива, збільшення тяги двигуна), що дозволили значно покращити продуктивність такої силової установки.

В роботі [5] відображено результат виконання числового моделювання, яке засвідчило збільшення ефективності газогенератору турбореактивного двоконтурного двигуна.

В роботі [6] застосований новий метод числового експерименту, як виконання обчислювальної гідродинаміки від входу до виходу турбореактивного двигуна, довів власну ефективність на протигагу традиційному фізичному експерименту, котрий вимагає наявності готової характеристики компресора.

В роботі [7] методом числового моделювання було доведено, що продуктивність силової установки значно залежить від характеристик вентилятора. Автори виконали чисельний експеримент на прикладі моделі турбо - прямооточного повітряного реактивного двигуна зі змінним циклом.

В результаті числового експерименту можна отримати повне уявлення про характер течії та визначити найбільш впливовий параметр, підібрати найбільш ефективну модель турбулентної в'язкості, котра замикає систему рівнянь Нав'є-Стокса [8].

Числове моделювання течії – актуальний і критично необхідний етап у послідовному дослідженні характеристик ступеня вентилятора. Залежність ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря у вентиляторі повністю відображає ефективність заданих параметрів потоку робочого повітря: осьової швидкості на вході в вентилятор, частоти обертання ротора, масової витрати на виході з робочого колеса.

Метою роботи є отримання залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна.

Для досягнення мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- провести моделювання течії у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна;
- оцінити візуалізацію ліній току робочого тіла при дослідженні течії для визначеного діапазону частот обертання.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження є робоче колесо вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності, що має периферійний діаметр - 2,338 м, втулковий діаметр - 0,652 м, кількість лопаток - 33. На рис. 1 наведено модель робочого колеса, на рис. 2 наведено схему лопатки в меридіональному перерізі.

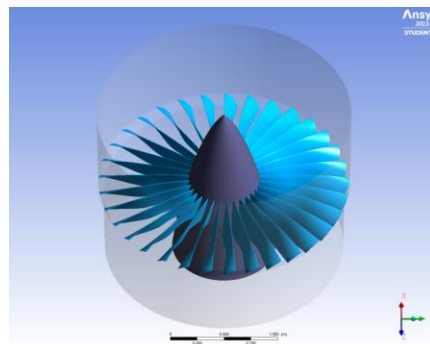


Рис. 1. Модель робочого колеса

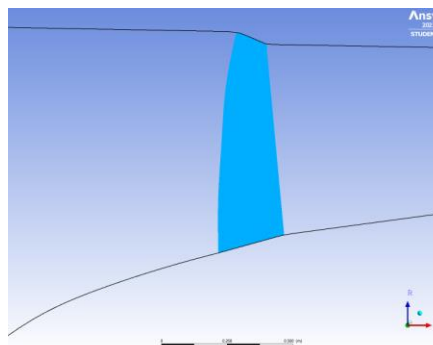


Рис. 2. Схема лопатки в меридіональному перерізі

Предметом дослідження є робочий процес осьового вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна.

Моделювання течії проводилося шляхом вирішення системи рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST, в програмному середовищі ANSYS Student. Для моделювання було створено розрахункову сітку з адаптацією примежового шару, з кількістю елементів 1199803 шт., вузлів – 331685 шт. На вході було задано осьову швидкість, на виході – масову витрату повітря. Моделювання течії проводилося при температурі навколишнього середовища +15°C та атмосферному тиску 101325 Па. Валідація даної математичної моделі була виконана у роботі [9]. Під витратною характеристикою мається на увазі залежність ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря. Досліджувались наступні режими роботи вентилятора: осьова швидкість на вході від 90 м/с до 160 м/с з кроком 10 м/с при відносній частоті обертання 100%, 95%, 90%, 85%, 80%, 70%.

Результати та обговорення

Під час проведення ряду числових експериментів з робочим колесом вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна отримано дані, які використано для побудови графіку залежності ступеня підвищення тиску до витрати повітря на різних режимах роботи досліджуваного вентилятора (рис. 3).

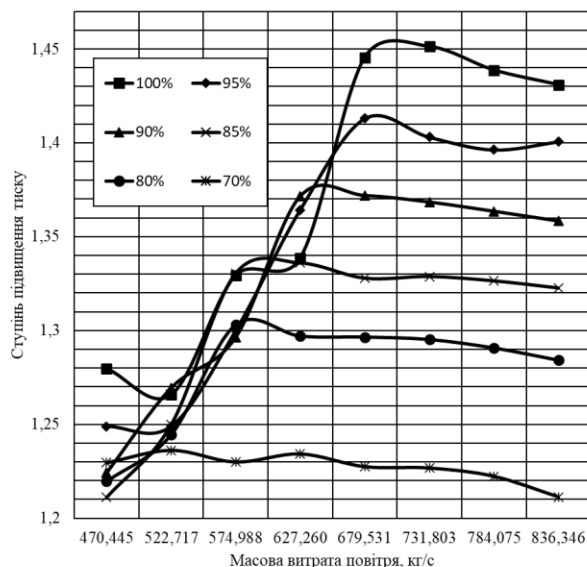


Рис. 3. Залежність ступеня підвищення тиску до витрати повітря

При відносній частоті обертання 70% значення ступеня підвищення тиску змінювалися від 1,23 до 1,21; при 80% - від 1,22 до 1,29; при 85% - від 1,21 до 1,32; 90% - від 1,23 до 1,36, 95% - 1,25 до 1,4; при

100% - від 1,28 до 1,43. Максимальне значення ступеня підвищення тиску було зафіксовано при відносній частоті обертання 100% та осьовій швидкості на вході 140 м/с – 1,45; мінімальне значення при 85% та 90 м/с – 1,21.

Під час дослідження течії в турбомашині значну увагу необхідно приділяти якісній оцінці, тобто візуалізації обтікання. На рис. 4 відображено лінії току в міжлопатковому каналі для витрати повітря в робочому колесі вентилятора 627,26 кг/с при різних відносних частотах обертання. З метою проведення порівняння шкалу було обрано однаковою для всіх режимів роботи. При різній частоті обертання та однаковій витраті повітря обтікання в робочому колесі вентилятора має різний характер. Частота обертання суттєво впливає на інтенсивність та локацію вихороутворень. Із розглянутих варіантів найменша інтенсивність вихороутворень спостерігається при роботі на відносній частоті обертання 70%. При режимі роботи на відносній частоті обертання 95% спостерігається зміщення вихрової зони обтікання у периферійну частину лопаткового вінця. При режимі роботи на відносній частоті обертання 90% та 85% характер обтікання досить схожий, вихрова область займає місце від середнього діаметру до кінцевого. При зниженні частоти обертання до 80% зона вихороутворень зменшується і концентрується вище середнього діаметру лопатки.

З отриманих даних можна зробити висновок, що наявна нерівномірність потоку за вихідними кромками лопаток вентилятора в області вище середнього діаметру. Вихори мають різну інтенсивність в різних місцях, що негативно впливає на робочий процес у вентиляторі та може викликати появу періодичної колової та радіальної нерівномірності потоку і як наслідок зрив, вібрацію вентиляторних лопаток.

Вирішити таку проблему може застосування методів керування примежовим шаром, зокрема застосування надроторного пристрою.

В подальшому планується дослідити вплив керування примежовим шаром методом застосування надроторного пристрою у цьому робочому колесі вентилятора турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності.

Висновки

Проведено моделювання течії у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності.

За результатами моделювання отримано серію витратних характеристик вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності при відносній частоті обертання від 70%

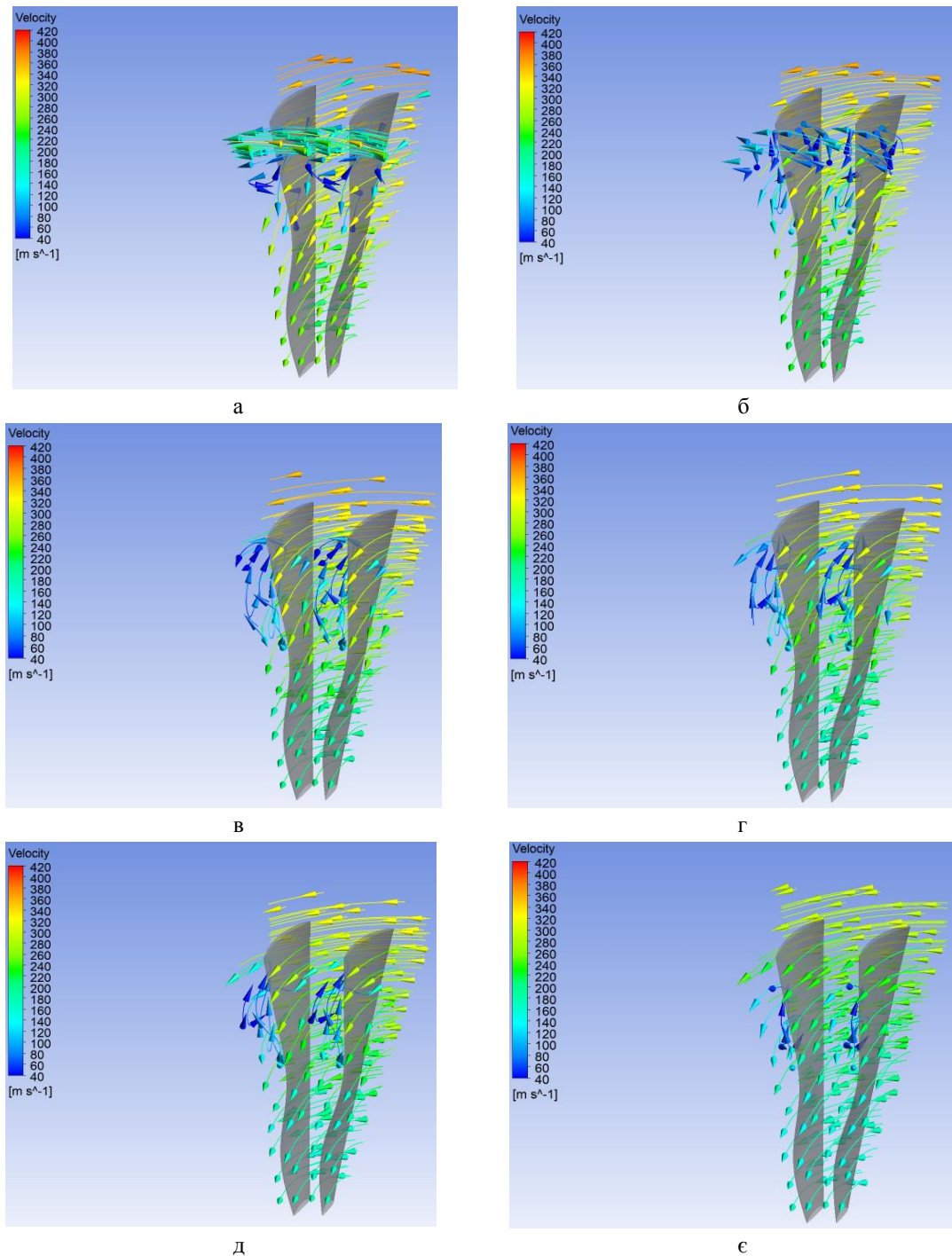


Рис. 4. Лінії току в міжлопатковому каналі робочого колеса вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна за витрати повітря в робочому колесі 627,26 кг/с при різній частоті обертання:
 а – $n=100\%$, б – $n=95\%$, в – $n=90\%$, г – $n=85\%$, д – $n=80\%$, є – $n=70\%$

до 100%. Ступінь підвищення тиску досліджуваного вентилятора змінюється від 1,21 до 1,45 при масовій витраті повітря від 470,45 кг/с до 836,35 кг/с.

Оцінено візуалізацію ліній току робочого тіла при дослідженні течії для визначеного діапазону частот обертання. При різній частоті обертання та однаковій витраті повітря обтікання в робочому колесі вентилятора має різний характер. Частота обертання суттєво впливає на інтенсивність та локацію

вихороутворень. Вирішити таку проблему може застосування методів керування примежовим шаром, зокрема застосування надротного пристрою. В подальшому планується дослідити вплив керування примежовим шаром методом застосування надротного пристрою у цьому робочому колесі вентилятора турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності.

Конфлікт інтересів

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

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

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

Подяка

Автор висловлює подяку кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Balli, O. Turbofan engine performances from aviation, thermodynamic and environmental perspectives [Text] / Ozgur Balli, & Hakan Caliskan // *Energy*. – 2021. – Vol. 232. – Article No. 121031. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121031.
2. High bypass turbofan engine and anti-icing system performance: Mass flow rate of anti-icing bleed air system effect [Text] / E. S. Abdelghany, H. H. Sarhan, A. El Saleh, & Mohamed B. Farghaly // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 45. – Article No. 102927. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102927.
3. Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models [Text] / Vyacheslav Merculov, Mykola Kostin, Gennadii Martynenko, Natalia Smetankina, & Volodymyr Martynenko // *Materials Today: Proceedings* – 2022. – Vol. 59. – P. 1797-1803. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.381.
4. Numerical modeling on installed performance of turbofan engine with inlet [Text] / Haoying Chen, Changpeng Cai, Shangbin Jiang, & Haibo Zhang // *Aerospace Science and Technology* – 2021. – Vol. 112. – P. 106590. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106590.
5. Sob, P. Modelling and designing of a turbofan engine with more enhanced overall engine efficiency during operation [Text] / Peter Sob, & Mothibeli Pita // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* – 2021. – Vol. 11. – P. 333-350. ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001.

6. Briones, A. Fully Coupled Turbojet Engine Computational Fluid Dynamics Simulations and Cycle Analyses Along the Equilibrium Running Line [Text] / Alejandro Briones, Andrew Caswell, & Brent Rankin // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* – 2021. – Vol. 143. – Article No. 061019. DOI: 10.1115/1.4049410.

7. Modeling and Cycle Parameter Matching of a High-Speed Variable Cycle Turbofan-Ramjet Engine [Text] / Yao Yao, Xiao-Bo Zhang, Mingyang Zhang, & Zhanxue Wang // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* – 2022. – Vol. 144. – Article No. 101003. DOI: 10.1115/1.4055214.

8. Жорник, О. В. Удосконалення характеристик кільцевого входного пристрою авіаційної силової установки з гвинтовентилятором [Текст] / О. В. Жорник, І. Ф. Кравченко, & М. М. Мітрахович // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4sup2 (174). – С. 11-18. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup2.02.

9. Тестова задача моделювання течії у ступені компресора Rotor 37 [Текст] / А. А. Дуленов, Є. В. Глобін, А. А. Ковтун, М. В. Хижняк, & К. В. Балаєва // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4. – С. 73-78. DOI: 10.32620/akt.2023.4.09.

10. Airflow Analysis of Contra-Rotating Fans Performance by Numerical Simulation [Text] / T. T. He, M. A. S. Abdelaal, I. Zaman, D. H. Didane, B. Manshoor // *Technological Advancement in Instrumentation & Human Engineering. ICMER 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering* – 2021. – Vol. 882. – P. 483-495. DOI: 10.1007/978-981-19-1577-2_36.

References

1. Balli, O., & Caliskan, H. Turbofan engine performances from aviation, thermodynamic and environmental perspectives. *Energy*, 2021, vol. 232, article no. 121031. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121031.
2. Abdelghany, E. S., Sarhan, H. H., El Saleh, A., & Farghaly, M. B. High bypass turbofan engine and anti-icing system performance: Mass flow rate of anti-icing bleed air system effect. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 45, article no. 102927. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102927.
3. Merculov, V., Kostin, M., Martynenko, G., Smetankina, N., & Martynenk, V. Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59, pp. 1797-1803. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.381.
4. Chen, H., Cai, C., Jiang, S., & Zhang, H. Numerical modeling on installed performance of turbofan engine with inlet. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 112, article no. 106590. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106590.
5. Sob, P., & Pita, M. Modelling and designing of a turbofan engine with more enhanced overall engine efficiency during operation. *International Journal of*

Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2021, vol. 11, pp. 333-350. ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001.

6. Briones, A., Caswell, A., & Rankin, B. Fully Coupled Turbojet Engine Computational Fluid Dynamics Simulations and Cycle Analyses Along the Equilibrium Running Line. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, vol. 143, article no. 061019. DOI: 10.1115/1.4049410.

7. Yao, Y., Zhang, X.-B., Zhang, M., & Wang, Z. Modeling and Cycle Parameter Matching of a High-Speed Variable Cycle Turbofan-Ramjet Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2022, vol. 144, article no. 101003. DOI: 10.1115/1.4055214.

8. Zhomyk, O. V., Kravchenko, I. F., & Mitrahovych, M. M. Udoshkonalennya kharakterystyk kiltsevoho vkhidnoho prystroyu aviatsynoyi sylovoyi ustanovky z hvyntoventylyatorom [Improvement of characteristics of the ring input device of the aviation

power plant with the screwfanter]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, vol. 4sup2 (174), pp. 11-18. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup2.02.

9. Dulyepov, A. A., Hlobin, Ye. V., Kovtun, A. A., Khyzhnyak, M. V., Balalayeva, K. V. Testova zadacha modelyuvannya techiyi u stupeni kompresora Rotor 37 [Test problem of flow modelling in the Rotor 37 compressor stage]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, vol. 4, pp. 73-78. DOI: 10.32620/aktt.2023.4.09.

10. He, T. T., Abdelaal, M. A. S., Zaman, I., Didane, D. H., & Manshoor, B. Airflow Analysis of Contra-Rotating Fans Performance by Numerical Simulation. *Technological Advancement in Instrumentation & Human Engineering. ICMER 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, vol. 882, pp. 483-495. DOI: 10.1007/978-981-19-1577-2_36.

Надійшла до редакції 10.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

SIMULATION OF FLOW IN THE FAN STAGE OF A TURBOFAN ENGINE

Andrii Duliepov

The subject of this research is the working process of the axial fan in a turbofan engine. The objective of this research was to investigate the fan impeller of a turbofan engine. The purpose of this work was to determine the dependence of the degree of pressure ratio on the air mass flow rate. In order to achieve this goal, the following tasks were performed: simulate the flow in the fan of a turbofan engine; to evaluate the visualization of the flow lines of the working body during the study of the flow over a certain range of rotation frequencies. During the study of the flow in the fan stage, a numerical experiment method was applied. Flow modeling was carried out by solving the system of Navier-Stokes equations, which were closed by the SST turbulent viscosity model in the ANSYS Student software environment. For modeling, a mesh with boundary layer adaptation was created with a number of 1199803 elements and 331685 nodes. This paper presents the results of modeling the flow in the fan stage of a turbofan engine. Results: a series of flow rate characteristics was obtained for the range of relative rotation frequencies from 70% to 100%. Studies have shown that the greatest pressure ratio was recorded at a relative rotation frequency of 100% - 1.45; the smallest value at 85% is 1.21. The flow lines in the inter-blade channel of the fan impeller were evaluated. At different rotation frequencies and with the same air consumption, the flow around the fan impeller exhibits a different character. The rotation frequency significantly affects the intensity and location of vortex formations. Among the considered options, the lowest intensity of vortex formation was observed at a relative rotation frequency of 70%. The scientific novelty and practical significance lies in the fact that new data on the flow characteristics of the impeller of the axial fan of a turbofan engine with a high bypass ratio were obtained by the method of a numerical experiment, and the results made it possible to generate initial data for further research on improving the fan characteristics.

Keywords: pressure ratio; air mass flow rate; gas turbine engine; turbofan engine; fan; impeller; blade; boundary layer; turbulent viscosity model; numerical simulation.

Дулєпов Андрій Андрійович – магістр, асп. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Andrii Duliepov – Master, PhD Student, Department of Aircraft Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: 3917687@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9257-3700.