

УДК 621.452.322.03-253.02-047.58

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.01

А. А. ДУЛЄПОВ, А. В. БАЛАЛАЄВ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ У СТУПЕНІ ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА З НАДРОТОРНИМ ПРИСТРОЄМ

Предметом дослідження виступає робочий процес робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності. **Об'єктом** дослідження є робоче колесо вентилятора з надроторним пристроєм турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності. **Мета роботи** – оцінити вплив надроторного пристрою на ступінь підвищення тиску вентилятора ТРДД з високим ступенем двоконтурності за різних умов роботи. **Поставлено та розв'язано наступні задачі** для її виконання: провести моделювання течії у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна з двома варіантами надроторного пристрою для діапазону частот обертання від 70% до 100%; провести оцінку впливу надроторного пристрою на характер обтікання в периферійній зоні робочого колеса вентилятора. При виконанні дослідження течії у ступені вентилятора з надроторним пристроєм було застосовано **метод** числового експерименту. Моделювання течії відбувалося через розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST, в програмному середовищі ANSYS Student. Було створено розрахункові сітки з кількістю вузлів – 174377 та 174492 шт. й елементів 963285 та 963195 шт. відповідно для двох різних конфігурацій. **Результати:** Проведено моделювання течії в осьовому вентиляторі з надроторним пристроєм двоконтурного турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності з двома різними конфігураціями надроторних пристроїв. За результатами моделювання отримано серію витратних характеристик вентилятора з двома різними конфігураціями надроторного пристрою турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності при відносній частоті обертання від 70% до 100%. При роботі вентилятора на відносній частоті обертання від 100% до 80% при масовій витраті від 470,45 кг/с до 523...630 кг/с ступінь підвищення тиску у вентиляторах з надроторним пристроєм зростає на 2,3...10,5%, при збільшенні масової витрати ступінь підвищення тиску зменшується на 2,4...1,5%. При режимі роботи вентилятора на відносній частоті 70% наявність надроторного пристрою сприяє зменшенню ступеня підвищення тиску в усьому діапазоні розглянутої масової витрати повітря, ступінь підвищення тиску зменшується 1,25%. Аналіз візуалізацій ліній току при обтіканні вентилятора показав, що наявність надроторного пристрою позитивно впливає на характер обтікання в робочому колесі, зони знижених швидкостей за лопатковим вінцем вентилятора зменшуються майже вдвічі. **Наукова новизна та практична значимість** полягає в тому, що методом числового експерименту отримані нові дані щодо витратної характеристики робочого колеса осьового вентилятора з надроторним пристроєм двоконтурного турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності, а результати дозволили сформулювати вихідні дані для подальшого дослідження щодо покращення характеристик вентилятора.

Ключові слова: надроторний пристрій; робоче колесо; вентилятор; ступінь підвищення тиску; масова витрата повітря; газотурбінний двигун; турбореактивний двоконтурний двигун з надвисоким ступенем двоконтурності; лопатка; модель турбулентної в'язкості; числове моделювання.

Вступ

Сілові установки з турбореактивними двоконтурними двигунами знаходять своє широке застосування у авіації завдяки характеристикам зниженої питомої витрати палива, збільшеним коефіцієнтам корисної дії у порівнянні з іншими типами газотурбінних двигунів. Детальне дослідження таких турбомашин дозволяє на постійній основі удосконалювати їх, знаходити шляхи покращення залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати,

видозмінювати конструкцію окремих ступенів, що є актуальною задачею багатьох двигунобудівників сучасності.

Лівова частка досліджень турбореактивних двоконтурних двигунів припадає на роботу зі ступенями компресора та/або вентилятора, які відіграють важливу роль у циклі таких силових установок. Дослідники працюють з математичними моделями, виконують газодинамічні розрахунки та підбивають підсумки з або без проведення фізичного експерименту, що дозволяє із заданою точністю та в досить швидкі

строки отримати результати числового моделювання. Багато наукових робіт присвячено вивченню залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати у ступенях холодної частини, а числове моделювання є надзвичайно сучасним та актуальним завданням серед них [1-5].

В роботі [1] було проведено числовий експеримент на одноступеневому трансзвуковому осьовому компресорі Rotor 37 з додаванням кільцевої канавки на корпусі одночасно з 36 каналами рециркуляції потоку, що були розташовані в області кінцевої частини лопаток робочого колеса. Результати засвідчили, що додавання каналів рециркуляції покращило напірну характеристику, дало приріст запасу стійкості, одночасно зменшивши втрати в адиабатичному коефіцієнті корисної дії.

В роботі [2] за допомогою числового експерименту змодельовано робочий процес ступеня трансзвукового осьового компресора з новою конструкцією дискретного типу пасивного саморециркуляційного надроторного пристрою. Параметричну оцінку впливу надроторного пристрою на кут перекошу впорскування було досліджено з метою досягти значного покращення запасу стійкості.

Авторами роботи [3] було виконано числове моделювання робочого процесу ступеня осьового трансзвукового компресора в умовах нерівномірності потоку шляхом об'єднання надроторного пристрою, техніки впорскування в область радіального зазору робочого колеса з ефектами шорсткості поверхні. За допомогою числового експерименту було детально досліджено взаємодію потоку ступеня компресора з ударними хвилями, а також вихроутворення та відрив примежового шару.

В роботі [4] на основі результатів числового моделювання спрощеної розрахункової моделі використано метод керуючої змінної для розробки спільної обробки корпусу та отримано ефективну схему надроторного пристрою. Багатоступінчасте повноканальне числове моделювання було використано для вивчення впливу схеми надроторного пристрою на продуктивність компресора за умови на вході однорідного та неоднорідного потоку.

Авторами роботи [5] було проведено числовий експеримент на моделі ступеня компресора Rotor 67. В роботі досліджувався вплив нерівномірності потоку на вході на характеристики трансзвукового ступеня компресора Rotor 67. Результати показали, що вхідна неоднорідність потоку викликає завихрення та перерозподіл масової витрати, що сильно позначається на умовах експлуатації ступеня вентилятора. Окрім того, числове моделювання виявило вплив на параметри течії за ступенем вентилятора, які виникають через урахування тривимірності обтікання та нестационарності потоку.

Аналіз наукових робіт [1-5] засвідчив, що числовому моделюванню робочих процесів у ступенях осьових вентиляторів та компресорів газотурбінних двигунів приділено надзвичайно велику увагу. В тому числі показано, що за допомогою моделювання можна досліджувати різні конструкції ступенів компресорів та вентиляторів з метою покращення їх характеристик. Однак до сих пір залишається не до кінця вирішеною задачею щодо дослідження впливу надроторного пристрою на ступінь підвищення тиску вентилятора ТРДД з високим ступенем двоконтурності.

Мета роботи – оцінити вплив надроторного пристрою на ступінь підвищення тиску вентилятора ТРДД з високим ступенем двоконтурності за різних умов роботи.

Поставлено та розв'язано наступні задачі для її виконання:

- провести моделювання течії у вентиляторі турбореактивного двоконтурного двигуна з двома варіантами надроторного пристрою для діапазону частот обертання від 70% до 100%;
- провести оцінку впливу надроторного пристрою на характер обтікання у периферійній зоні робочого колеса вентилятора.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження є робоче колесо вентилятора з надроторним пристроєм турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності (рис. 1).

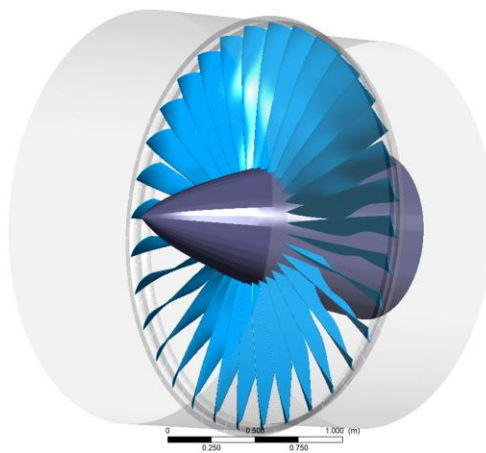


Рис. 1. Ізометричний вид моделі робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм

Досліджується два варіанти надроторних пристроїв: без стінки (рис. 2, а) та зі стінкою товщиною 1 мм (рис. 2, б). Робоче колесо вентилятора має периферійний діаметр - 2,338 м, втулковий діаметр - 0,652 м, кількість лопаток - 33.

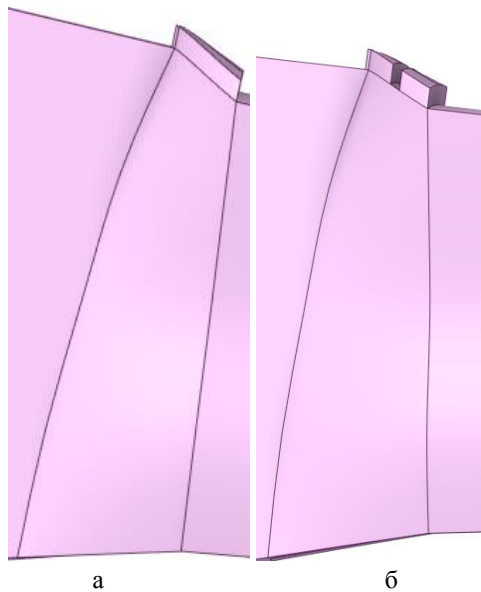


Рис. 2. Модель робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм:
а – без стінки, б – зі стінкою 1 мм

Предметом дослідження виступає робочий процес робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності.

Моделювання течії відбувалося через розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST, в програмному середовищі ANSYS Student. Було створено розрахункові сітки з кількістю вузлів – 174377 та 174492 шт. й елементів 963285 та 963195 шт. відповідно для двох різних геометричних моделей досліджуваних робочих коліс вентилятора з надроторним пристроєм. На вході було задано осьову швидкість, на виході масову витрату повітря. Моделювання течії проводилося за температури навколишнього середовища +15°C та атмосферного тиску 101325 Па. Валідацію даної математичної моделі виконано в роботі [6]. Під витратною характеристикою мається на увазі залежність ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря. Було досліджено такі 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

При проведенні серії числових експериментів з робочим колесом вентилятора з двома варіантами надроторного пристрою турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності отримано дані, які використано для побудови графіків залежності ступеня підвищення тиску від масової

витрати повітря вентилятора для визначеного діапазону відносної частоти обертання (рис. 3). Також для оцінки впливу надроторного пристрою на ступінь підвищення тиску РК вентилятора на вищезазначених графіках додано дані щодо залежності ступеня підвищення тиску від масової витрати для цього РК вентилятора без надроторного пристрою.

Аналіз отриманих залежностей показує, що наявність надроторного пристрою впливає на ступінь підвищення тиску вентилятора.

При роботі робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм без стінки в діапазоні масової витрати від 470,445 кг/с до 836,35 кг/с при відносній частоті обертання $n=100\%$ ступінь підвищення тиску π змінюється від 1,37 до 1,43; при $n=95\%$ - від 1,34 до 1,39; при $n=90\%$ - від 1,30 до 1,36; при $n=85\%$ - від 1,28 до 1,32; при $n=80\%$ - від 1,25 до 1,29; при $n=70\%$ - мінімальне значення ступінь підвищення тиску $\pi=1,21$, максимальне значення - $\pi=1,23$.

При роботі робочого колеса вентилятора з надроторним пристроєм зі стінкою 1 мм в діапазоні масової витрати від 470,445 кг/с до 836,35 кг/с при відносній частоті обертання 100% ступінь підвищення тиску π змінюється від 1,37 до 1,43; при 95% - від 1,32 до 1,39; 90% - від 1,31 до 1,36; 85% - від 1,26 до 1,32; при 80% - від 1,25 до 1,30; при 70% - від 1,21 до 1,23.

Отже, наявність стінки у надроторному пристрої робочого колеса вентилятора впливає на ступінь підвищення тиску не суттєво. Для розглянутого діапазону частот ступінь підвищення тиску відрізняється до 1,1%.

При порівнянні характеристик вентилятора без надроторного пристрою та з надроторними пристроями, треба відмітити, що ступінь підвищення тиску в певних діапазонах меншої масової витрати зростає, при збільшенні масової витрати через вхідний переріз вентилятора - зменшується.

При роботі на відносній частоті обертання 100% та 95% від 470,45 кг/с до 630 кг/с ступінь підвищення тиску π зростає до 8,6...10,5%, при збільшенні масової витрати - π зменшується на 1,8...2,4%.

При обертанні ротора вентилятора на відносній частоті 90% ступінь підвищення тиску π зростає до 7,1% при масовій витраті від 470,45 кг/с до 575 кг/с. При збільшенні масової витрати, ступінь підвищення тиску зменшується на 1,9%.

При роботі вентилятора на відносній частоті 85% та 80% ступінь підвищення тиску π зростає до 2,3...5,4% при масовій витраті від 470,45 кг/с до 523кг/с. При збільшенні масової витрати, ступінь підвищення тиску зменшується на 1,8%.

При режимі роботи на відносній частоті 70% наявність надроторного пристрою сприяє зменшенню

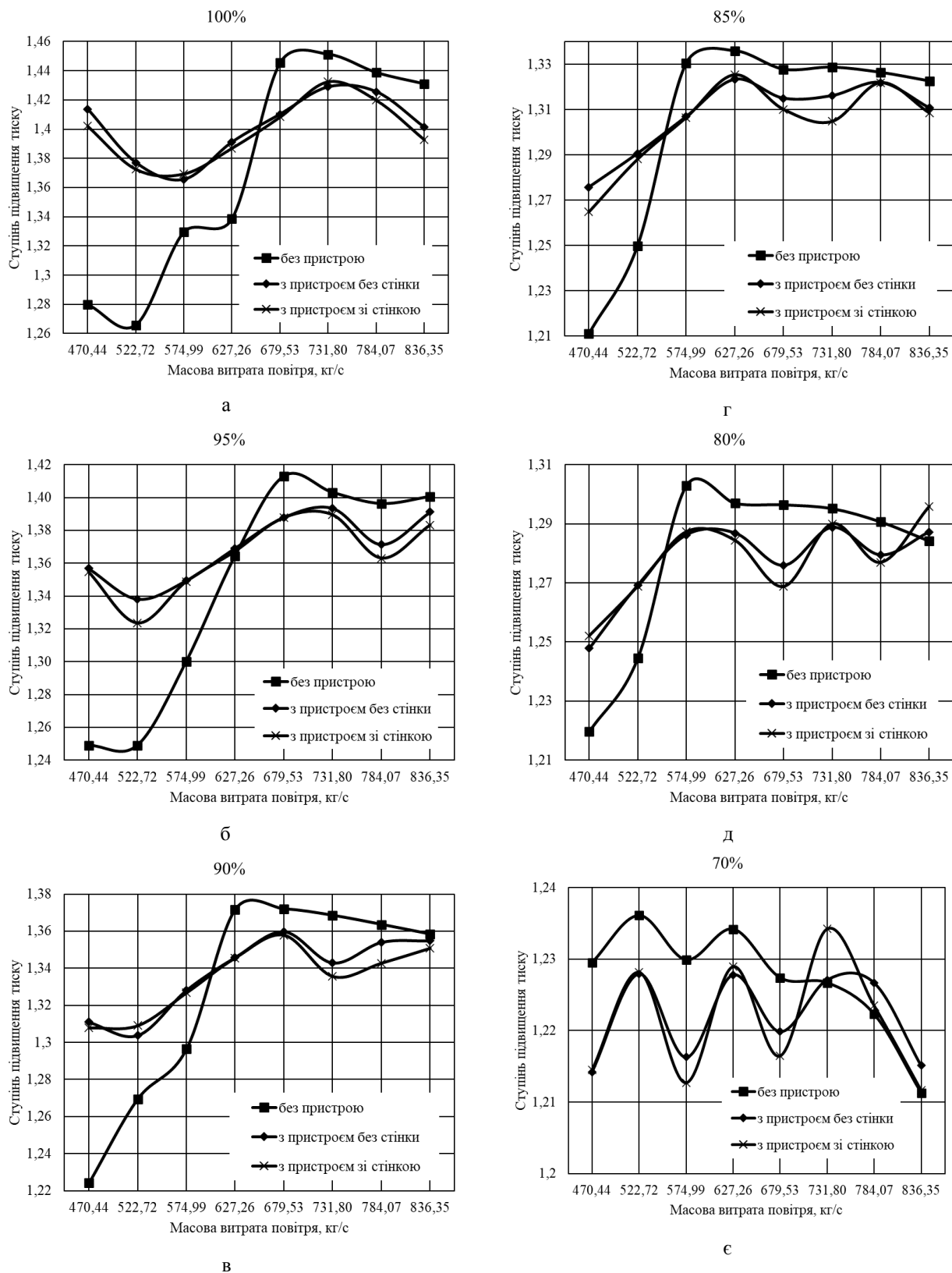


Рис. 3. Залежність ступеня підвищення тиску від масової витрати повітря з двома варіантами надроторного пристрою та без нього для відносних частот обертання 100%-70%:

а – відносна частота обертання 100%; б – відносна частота обертання 95%;

в – відносна частота обертання 90%; г – відносна частота обертання 85%;

д – відносна частота обертання 80%; є – відносна частота обертання 70%

ступеня підвищення тиску в усьому діапазоні розглянутої масової витрати повітря, ступінь підвищення тиску зменшується 1,25%.

При дослідженні течії в вентиляторах велику увагу треба приділяти якійсь оцінці - візуалізації обтікання. На рис. 4 відображено лінії току в міжлопатковому каналі для трьох випадків: з надроторними пристроями та без надроторного пристрою.

Режим роботи - відносна частота обертання 80% за витрати повітря 680 кг/с. З метою проведення порівняння шкалу було обрано однаковою.

Аналіз візуалізації ліній току при обтіканні вентилятора показав, що наявність надроторного пристрою впливає на характер обтікання в робочому колесі. З дослідженими конфігураціями надроторних пристроїв спостерігається зменшення інтенсивності зони вихрового обтікання за лопатковим вінцем. Зона понижених швидкостей зменшується майже вдвічі та зникає з периферійної частини лопаткового вінця. Можна зробити висновок, що наявність надроторного пристрою позитивно впливає на характер обтікання робочого колеса вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності.

Висновки

Проведено моделювання течії в осьовому вентиляторі з надроторним пристроєм двоконтурного турбореактивного двигуна з високим ступенем двоконтурності з двома різними конфігураціями надроторних пристроїв.

За результатами моделювання отримано серію витратних характеристик вентилятора з двома різними конфігураціями надроторного пристрою турбореактивного двоконтурного двигуна з високим ступенем двоконтурності при відносній частоті обертання від 70% до 100%.

При роботі вентилятора на відносній частоті обертання від 100% до 80% при масовій витраті від 470,45 кг/с до 523...630 кг/с ступінь підвищення тиску у вентиляторах з надроторним пристроєм зростає на 2,3...10,5%, при збільшенні масової витрати ступінь підвищення тиску зменшується на 2,4...1,5%.

При режимі роботи вентилятора на відносній частоті 70% наявність надроторного пристрою сприяє зменшенню ступеня підвищення тиску в усьому діапазоні розглянутої масової витрати повітря, ступінь підвищення тиску зменшується 1,25%.

Аналіз візуалізацій ліній току при обтіканні вентилятора показав, що наявність надроторного пристрою позитивно впливає на характер обтікання в робочому колесі, зони знижених швидкостей за лопатковим вінцем вентилятора зменшуються майже вдвічі.

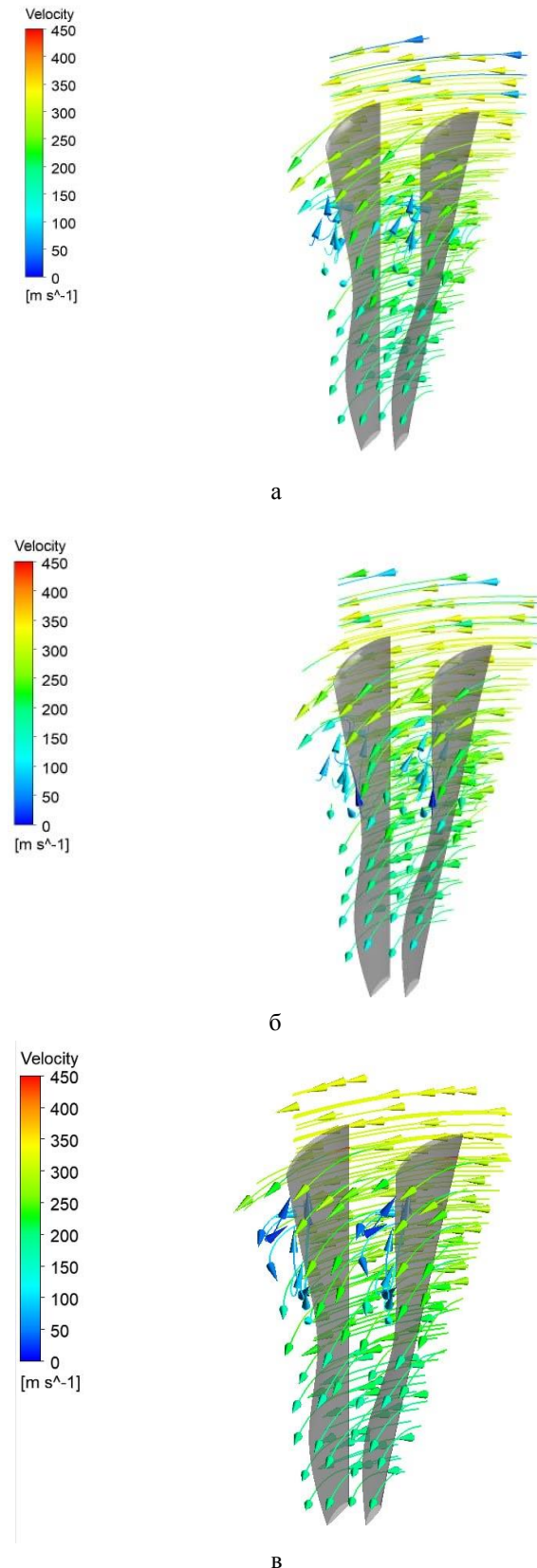


Рис. 4. Лінії току в міжлопатковому каналі вентилятора:
а – з надроторним пристроєм без стінки,
б – з надроторним пристроєм зі стінкою 1 мм,
в – без надроторного пристрою

Внесок авторів: концептуалізація, методологія – А. А. Дулепов, А. В. Балаласв; огляд та аналіз інформаційних джерел – А. А. Дулепов; постановка задачі, розробка моделі – А. В. Балаласв, А. А. Дулепов; аналіз результатів – А. А. Дулепов.

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 не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

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

Подяка

Автори висловлюють подяку кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Vuong, T.-D. *Recirculation-groove coupled casing treatment for a transonic axial compressor* [Text] / Tien-Dung Vuong, Kwang-Yong Kim, & Cong-Truong Dinh // *Aerospace Science and Technology* – 2021. – Vol. 111. – Article No. 106556. DOI: 10.1016/J.AST.2021.106556.
2. *Aerodynamic behavior of a transonic axial flow compressor stage with self-recirculating casing treatment* [Text] / S. Kumar, D. B. Alone, S. M. Thimmaiah [et al] // *Aerospace Science and Technology* – 2021. – Vol. 112. – Article No. 106587. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106587.
3. Srinivas, G. *Performance Evaluation of Transonic Axial Flow Compressor under Distorted Conditions by Groove Casing Technique with Tip Injection and Surface Roughness Effects* [Text] / G. Srinivas, K. Raghunandana, & B. Satish Shenoy // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*.

– 2022. – Vol. 103. – P. 895-911. DOI: 10.1007/s40032-022-00851-7.

4. *The influence of a coupled casing on the performance of a multistage compressor under inlet distortion conditions* [Text] / Hong Xie, Guoming Zhu, Li Huanjun, & Chunrong Wang // *AIP Advances*. – 2023. – Vol. 13. – Article No. 125222. DOI: 10.1063/5.0185385.

5. Jerez Fidalgo, V. *A Study of Fan-Distortion Interaction Within the NASA Rotor 67 Transonic Stage* / V. Jerez Fidalgo, C. A. Hall, & Y. Colin // *Journal of Turbomachinery*. – 2012. – Vol. 134. – Article No. 051011. DOI: 10.1115/1.4003850.

6. *Тестова задача моделювання течії у ступені компресора Rotor 37* [Текст] / А. А. Дулепов, Є. В. Глобін, А. А. Ковтун [та інші] // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4 (188). – С. 73-78. DOI: 10.32620/akt.2023.4.09.

References

1. Vuong, T.-D., Kim, K.-Y., & Dinh, C.-T. *Recirculation-groove coupled casing treatment for a transonic axial compressor*. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 111, article no. 106556. DOI: 10.1016/J.AST.2021.106556.
2. Kumar, S., Alone, D. B., Thimmaiah, S. M., Mudipalli, J. R. R., Kumar, L., Ganguli, R., Kandagal, S. B., & Jana, S. *Aerodynamic behavior of a transonic axial flow compressor stage with self-recirculating casing treatment*. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 112, article no. 106587. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106587.
3. Srinivas, G., Raghunandana, K., & Shenoy, B. S. *Performance Evaluation of Transonic Axial Flow Compressor under Distorted Conditions by Groove Casing Technique with Tip Injection and Surface Roughness Effects*. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2022, vol. 103, pp. 895-911. DOI: 10.1007/s40032-022-00851-7.
4. Hong, X., Guoming, Z., Li, H., & Chunrong, W. *The influence of a coupled casing on the performance of a multistage compressor under inlet distortion conditions*. *AIP Advances*, 2023, vol. 13, article no. 125122. DOI: 10.1063/5.0185385.
5. Jerez Fidalgo, V., Hall, C. A., & Colin, Y. *A Study of Fan-Distortion Interaction Within the NASA Rotor 67 Transonic Stage*. *Journal of Turbomachinery*, 2012, vol. 134, article no. 051011. DOI: 10.1115/1.4003850.
6. Dulyepov, A. A., Hlobin, Ye. V., Kovtun, A. A., Khyzhnyak, M. V., & Balalayeva, K. V. *Тестова задача моделювання течії у ступені компресора Rotor 37* [Test problem of flow modelling in the Rotor 37 compressor stage]. *Авіаційно-космічна техніка і технологія - Aerospace Technic and Technology*, 2023, vol. 4 (188), pp. 73-78. DOI: 10.32620/akt.2023.4.09.

SIMULATION OF THE FLOW IN THE FAN STAGE OF A TURBOFAN ENGINE WITH ANNULAR GROOVES CASING TREATMENT*Andrii Dulieпов, Anton Balalaiev*

The subject of this study is the working process of the axial fan under the annular groove casing treatment of the turbofan engine. **The object** of the present study is to investigate the fan impeller of a turbofan engine subjected to an annular groove casing treatment. **The purpose** of this work was to evaluate the effect of an annular groove casing treatment on the pressure ratio of a turbofan engine with a high bypass ratio under different operating conditions. The following tasks were set and solved for their implementation: simulation of the flow in the fan of a turbofan engine with two variants of the annular groove casing treatment for the range of rotation frequencies from 70% to 100%; evaluate the influence of the annular groove casing treatment on the nature of the flow in the peripheral zone of the fan impeller. A numerical experiment **method** was used to study the flow in the fan stage with the annular groove casing treatment. Flow simulation was performed by solving the system of Navier-Stokes equations, which were closed by the SST turbulent viscosity model, in the ANSYS Student software environment. Meshes were created with the number of nodes – 174377 and 174492 units and the number of elements 963285 and 963195 pcs. respectively for two different configurations. **Results:** Simulation of the flow in an axial fan with an annular groove casing treatment of a turbofan engine with a high bypass ratio with two different configurations of an annular groove casing treatment was carried out. According to the simulation results, a series of flow characteristics of the fan with two different configurations of the annular groove casing treatment of a turbofan engine with a high bypass ratio at a relative rotation frequency of 70% to 100% were obtained. When the fan is operating at a relative rotation frequency from 100% to 80% with a mass flow rate from 470.45 kg/s to 523...630 kg/s, the pressure ratio in fans with an annular groove casing treatment increases by 2.3...10.5%, and with an increase in mass flow rate, the pressure ratio decreases by 2.4...1.5%. When the fan is operating at a relative frequency of 70%, the presence of an annular groove casing treatment helps to reduce the pressure ratio in the entire range of the considered mass flow rate, thereby reducing the pressure ratio by 1.25%. Analysis of visualizations of streamlines when flowing around the fan impeller showed that the presence of an annular groove casing treatment has a positive effect on the character of the flow in the impeller, and the zones of reduced speeds behind the blades of the fan are reduced by almost half. **The scientific novelty and practical significance** lies in the fact that new data on the flow characteristics of the impeller of an axial fan and an annular groove casing treatment 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 form initial data for further research on improving the characteristics of the fan.

Keywords: annular grooves casing treatment; impeller; fan; pressure ratio; air mass flow rate; gas turbine engine; turbofan engine with a high bypass ratio; blade; turbulent viscosity model; numerical simulation.

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

Балалаєв Антон Валерійович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. механіки, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Andrii Dulieпов – Master, PhD Student, Department of Aircraft Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,

e-mail: 3917687@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9257-3700.

Anton Balalaiev – Doctor of Philosophy, Senior Lecturer of the Mechanics Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,

e-mail: anton.balalaiev@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3603-4512.