

УДК 621.452.322.02-047.58

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.03

А. В. БАЛАЛАЄВ, К. В. БАЛАЛАЄВА, Ю. Ю. ТЕРЕЩЕНКО

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ В ДВОРЯДНОМУ ВЕНТИЛЯТОРІ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА

Сучасні тенденції світового авіабудування спонукають інженерів авіаційних двигунів створювати і розробляти різні заходи для підвищення аеродинамічних характеристик лопаткових машин. Нагальна потреба підвищення економічності двигунів нового покоління приводить до стрімкого підвищення ступеня двоконтурності двигунів, що потребує розробки вентиляторів з великими діаметральними розмірами та високою аеродинамічною досконалістю. Управління пограничним шаром в лопаткових машинах за допомогою застосування дворядних лопаткових вінців – один з перспективних способів покращення аеродинамічних характеристик вентиляторів авіаційних двигунів з великим ступенем двоконтурності. Метою роботи є оцінка аеродинамічних характеристик вентилятора з дворядним робочим колесом для двоконтурного двигуна. Досліджувалися два робочих колеса вентилятора: однорядне і еквівалентне дворядне (еквівалентність забезпечувалася рівністю конструктивних кутів входу і виходу потоку і рівності хорди профілів). Лопатковий вінець складався з 33 лопаток, зовнішній діаметр на вході в робоче колесо - 2,37 м, втулковий діаметр - 0,652 м. Моделювання течії проводилось в діапазоні осьової швидкості на вході від 80 до 200 м/с при відносній частоті обертання ротора 0,65, 0,85 і 0,9. Для досліджуваного дворядного робочого колеса вентилятора хорда першого ряду становила 60% від сумарної хорди профілю, довжина щільного каналу - 10% від сумарної хорди. Моделювання течії було виконано за допомогою чисельного експерименту. При замиканні системи рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася модель турбулентності SST Менгера. Розрахункова сітка - неструктурована, з адаптацією пограничного шару. В роботі показано, що застосування дворядного робочого колеса дозволить покращити аеродинамічні характеристики вентилятора. В результаті проведеного дослідження отримано, що ступінь підвищення тиску у вентиляторі з дворядним робочим колесом зростає від 0,32 до 20% для режиму роботи при відносній частоті обертання $n=0,65$, $n=0,85$, та $n=0,9$ в діапазоні значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots 1$. Найбільше зростання спостерігається на лівих гілках напірних ліній. Отримані дані щодо ККД вентилятора з дворядним робочим колесом показали, що в діапазоні значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots 0,6$ та $q(\lambda)=0,76\dots 0,98$ ККД вентилятора з дворядним робочим колесом більше, ніж ККД вентилятора з однорядним робочим колесом, для значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,64\dots 0,76$ – ККД вентилятора з дворядним робочим колесом менше на 4%, ніж ККД вентилятора з однорядним робочим колесом.

Ключові слова: вентилятор; моделювання течії; дворядне робоче колесо; ККД; ступінь підвищення тиску; ефективність; чисельний експеримент.

Вступ

Сучасні тенденції світового авіабудування спонукають інженерів авіаційних двигунів створювати і розробляти різні заходи для підвищення аеродинамічних характеристик лопаткових машин. Нагальна потреба підвищення економічності двигунів нового покоління приводить до стрімкого підвищення ступеня двоконтурності двигунів, що потребує розробки вентиляторів з великими діаметральними розмірами та високою аеродинамічною досконалістю. Управління пограничним шаром в лопаткових машинах за допомогою застосування дворядних лопаткових вінців – один з перспективних способів покращення аеродинамічних характеристик вентиляторів авіаційних двигунів з великим ступенем двоконтурності.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Основи теорії конфузюрних і дифузюрних дворядних решіток надано в монографії Ю. М. Терещенка [1]. За останнє десятиріччя опубліковано досить багато наукових робіт щодо застосування дворядних лопаткових вінців робочих коліс (РК) осьового компресора і вентилятора. В роботі [2] представлені результати фізичного і чисельного експерименту щодо порівняння однорядного РК і еквівалентного дворядного РК осьового вентилятора. Отримано дані, які підтверджують, що застосування дворядних лопаткових вінців у робочих колесах дозволяють збільшити ступінь підвищення тиску. Автори роботи [3] в якості об'єкту досліджень обрали вже відомий Rotor 37, і замість однорядного РК розробили

еквівалентне дворядне РК з метою оцінити можливості покращення аеродинамічних характеристик завдяки управлінню пограничним шаром в РК. Результати досліджень показали, що ступінь підвищення тиску зросла на 17 % в порівнянні з Rotor 37 з однорядним РК, при цьому автори також оцінили ККД, який також зріс на 2 %. В роботі [4] представлені результати оптимізації трансзвукового дворядного робочого колеса. Автори враховували в процесі оптимізації відносну довжину лопатки, кривизну профілю, співвідношення хорди профілю у втулки і на периферії. В результаті оптимізації авторам вдалося знизити втрати повного тиску на 20%. Результати, представлені в роботі [5], присвячені оптимізації конструкції дворядного лопаткового вінця. Поряд з підвищенням напірності ступеня компресора, авторам вдалося досягти підвищення ККД завдяки оптимізації кута повороту потоку.

В роботі [6] досліджуються аеродинамічні характеристики трансзвукового широкохордного вентилятора. Автори показали, що застосування дворядних лопаток дозволило підвищити напірність робочого колеса вентилятора і витрату повітря на вході при незмінному запасі газодинамічної стійкості. В роботі [7] автори змогли досягти ступінь підвищення тиску 2,25 в дворядному трансзвуковому вентиляторі. Автори акцентують увагу на тому, що співвідношення хорд першого і другого ряду має вплив на аеродинамічні характеристики дворядного робочого колеса.

Як показав літературний огляд, використання еквівалентних дворядних лопаткових вінців в робочих колесах компресора і вентилятора дозволяє збільшити ступінь підвищення тиску ступені. Однак залишаються не до кінця вирішені питання щодо дослідження аеродинамічних характеристик вентиляторів з дворядним РК для турбореактивних двоконтурних двигунів (ТРДД) з великим ступенем двоконтурності.

Мета роботи – оцінка аеродинамічних характеристик вентилятора з дворядним РК для двоконтурного двигуна зі ступенем двоконтурності 5,6.

Постановка задачі дослідження

В даній роботі досліджуються аеродинамічні характеристики робочого колеса вентилятора ТРДД зі ступенем двоконтурності 5,6.

Досліджувалися два робочих колеса вентилятора (рис. 1, 2): однорядне і еквівалентне дворядне (еквівалентність забезпечувалася рівністю конструктивних кутів входу і виходу потоку і рівності хорди профілів).

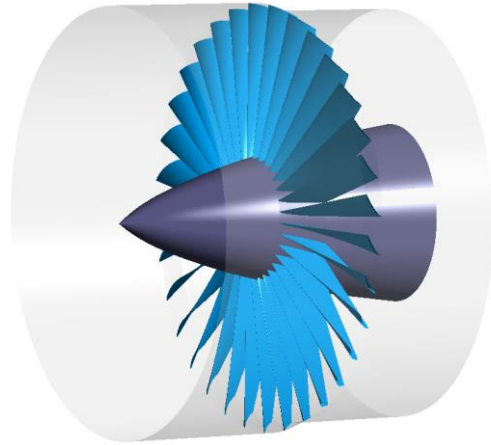
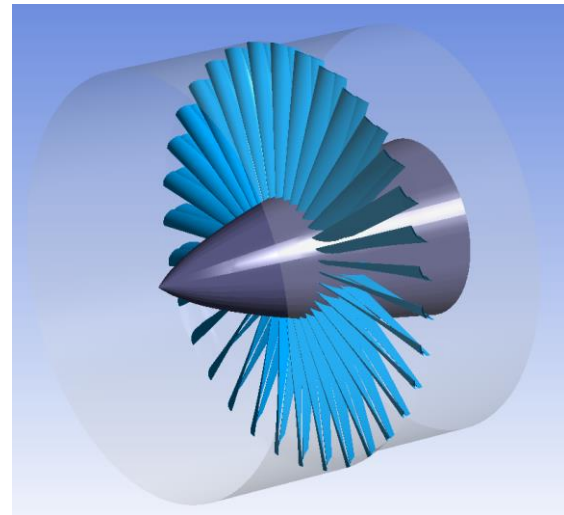


Рис. 1. Твердотільна модель досліджуваного вентилятора з однорядним робочим колесом



а



б

Рис. 2. Твердотільна модель досліджуваного вентилятора з дворядним робочим колесом:

а – лопатковий вінець;

б – фрагмент лопаткового вінця

Лопатковий вінець складався з 33 лопаток, зовнішній діаметр на вході в РК - 2,37м, втулковий діаметр - 0,652м. Моделювання течії проводилось в діапазоні осьової швидкості на вході від 80 до 200 м/с при відносній частоті обертання ротора 0,65, 0,85 і 0,9. Згідно з рекомендаціями, викладеними в [1] для досліджуваного дворядного РК вентилятора хорда першого ряду становила 60% від сумарної хорди профілю, довжина щілинного каналу - 10% від сумарної хорди.

Аналіз результатів досліджень

Моделювання течії було виконано за допомогою чисельного експерименту. При замиканні системи рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася модель турбулентності SST Ментера (на основі вибору і обґрунтування параметрів чисельного експерименту наведеному в роботі [8]). Розрахункова сітка - неструктурована, з адаптацією пограничного шару.

На рис. 3, 4 представлено векторне поле швидкостей при обтіканні однорядного і еквівалентного дворядного РК вентилятора на середньому радіусі при $q(\lambda)=0,598$.

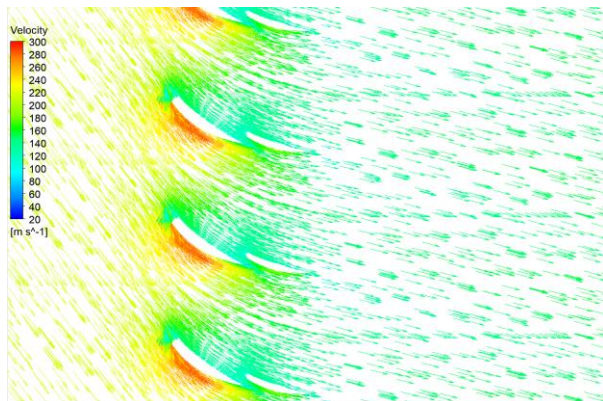


Рис. 3. Векторне поле швидкостей дворядного РК вентилятора на середньому радіусі $q(\lambda)=0,598$

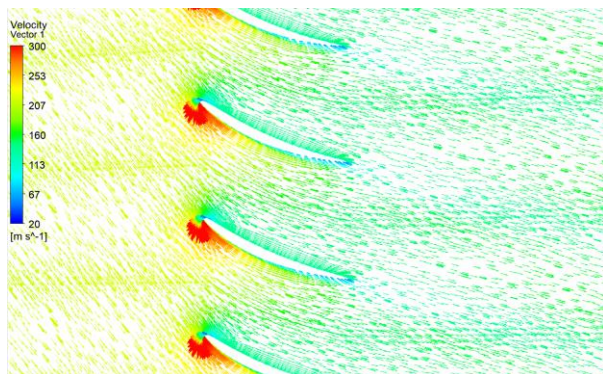


Рис. 4. Векторне поле швидкостей однорядного РК вентилятора на середньому радіусі $q(\lambda)=0,598$

Візуалізація обтікання дає можливість оцінити вплив ефекту дворядності: характер обтікання в пограничному шарі на лопатках змінюється, також можна відзначити, що кут виходу потоку в дворядному РК дещо збільшується.

На основі розрахунку течії в однорядному і еквівалентному дворядному робочому колесі вентилятора були отримані напірні характеристики у вигляді залежностей ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати (рис.5).

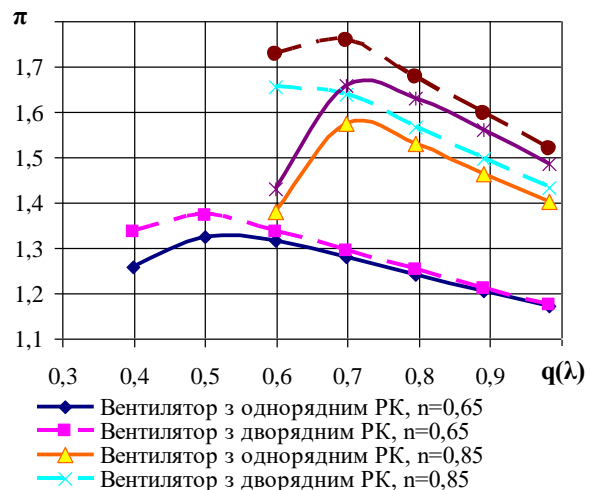


Рис. 5. Залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати для однорядного і дворядного РК вентилятора

Аналіз отриманих залежностей показує, що на всіх досліджуваних частотах обертання вентилятор з дворядним РК має більший ступінь підвищення тиску, ніж вентилятор з однорядним РК. Також слід відмітити, що при відносній частоті обертання 0,65 спостерігається найменше підвищення ефективності вентилятора. Загалом, ступінь підвищення тиску у вентиляторі з дворядним РК зростає від 0,32 до 20 % для режиму роботи при відносній частоті обертання $n=0,65$, $n=0,85$, та $n=0,9$ в діапазоні значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots 0,98$. Найбільше зростання спостерігається на лівих гілках напірних ліній. Для відносної частоти обертання $n=0,65$ – ступінь підвищення тиску зростає від 0,32 до 6%, для $n=0,85$ та $0,9$ – з 2,2 до 20%.

На рис.6 подано залежність ККД від газодинамічної функції витрати $q(\lambda)$. Суцільною лінією подано результати для вентилятора з дворядним РК, пунктирною лінією – для вентилятора з однорядним РК.

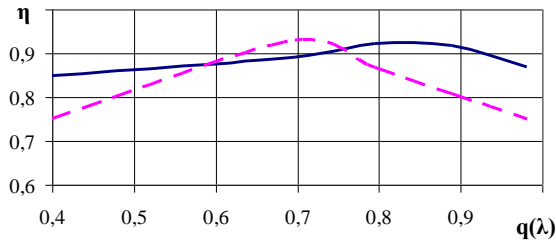


Рис. 6. Залежність ККД від газодинамічної функції витрати для однорядного і дворядного РК вентилятора

Отримані залежності показують, що в діапазоні газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots0,6$ та $q(\lambda)=0,76\dots0,98$ ККД вентилятора з дворядним РК більше, ніж ККД вентилятора з однорядним РК, для значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,64\dots0,76$ – ККД вентилятора з дворядним РК менше на 4 %, ніж ККД вентилятора з однорядним РК.

Висновки

В роботі проведено дослідження аеродинамічних характеристик вентилятора ТРДД з дворядним РК. Показано, що застосування дворядного РК дозволить покращити аеродинамічні характеристики вентилятора. В результаті проведеного дослідження отримано, що ступінь підвищення тиску у вентиляторі з дворядним РК зростає від 0,32 до 20 % для режиму роботи при відносній частоті обертання $n=0,65$, $n=0,85$, та $n=0,9$ в діапазоні значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots1$. Найбільше зростання спостерігається на лівих гілках напірних ліній. Отримані дані щодо ККД вентилятора з дворядним РК показали, що в діапазоні значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,4\dots0,6$ та $q(\lambda)=0,76\dots0,98$ ККД вентилятора з дворядним РК більше, ніж ККД вентилятора з однорядним РК, для значень газодинамічної функції витрати $q(\lambda)=0,64\dots0,76$ ККД вентилятора з дворядним РК менше на 4 %, ніж ККД вентилятора з однорядним РК.

Література

1. Терещенко, Ю. М. *Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст]* / Ю. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.
2. Kumar, A. *Design and off-design behavior of a tandem rotor stage [Text]* / A. Kumar, A. M. Pradeep // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. – 2019.

– Vol. 234, Iss. 4. – P. 927-942. DOI: 10.1177/0954410019893162.

3. Mohsen, M. *The impact of tandem rotor blades on the performance of transonic axial compressors [Text]* / M. Mohsen, F. M. Owis, A. A. Hashim // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 67. – P. 237-248. DOI: 10.1016/j.ast.2017.04.019.

4. *Analysis of Flow Characteristic of Transonic Tandem Rotor Airfoil and Its Optimization [Text]* / Yuan Tao, Yifei Wu, Xianjun Yu [et al.] // *Applied Science*. – 2020. – Vol. 10. – 13 p. DOI: 10.3390/app10165569.

5. *Optimization of Tandem Blade Based on Improved Particle Swarm Algorithm [Text]* / S. Zhaoyun, B. Liu, M. Xiaochen [et al.] // *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. – 2016. – Vol. 2C. – 12 p. DOI: 10.1115/GT2016-56901.

6. *Numerical investigation on the aerodynamic performance and flow mechanism of a fan with a partial-height booster rotor [Text]* / Ch. Zhou, Z. Li, S. Huang [et al.] // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol. 109. – Article Id: 106411. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106411.

7. Zhao, B. *Effects of Relative Geometry Position of Forward and Aft Blades on Performance of Tandem Rotor [Text]* / B. Zhao, B.-J. Liu // *Journal of Propulsion Technology*. – 2012. – Vol. 33, Iss. 1. – P. 26-36.

8. Balalaiev, A. *Flow simulation in an elementary tandem vane row of compressor [Text]* / A. Balalaiev // *Annali d'Italia*. – 2020. – No. 10-1. – P. 51–54

References

1. Tereshhenko, Yu. M. *Ajerodinamicheskoe sovershenstvovanie lopatochnyh apparatov kompressorov [Aerodynamic improvement of compressor blades]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 168 p.
2. Kumar, A., Pradeep, A. M. *Design and off-design behavior of a tandem rotor stage. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2019, vol. 234, no. 4, pp. 927-942. DOI: 10.1177/0954410019893162.
3. Mohsen, M., Owis, F. M., Hashim, A. A. *The impact of tandem rotor blades on the performance of transonic axial compressors. Aerospace Science and Technology*, 2017, vol. 67, pp. 237-248. DOI: 10.1016/j.ast.2017.04.019.
4. Tao, Yuan., Wu, Yifei., Yu, Xianjun., Liu, Baojie. *Analysis of Flow Characteristic of Transonic Tandem Rotor Airfoil and Its Optimization. Applied Science*, 2020, vol. 10. 13 p. DOI: 10.3390/app10165569.
5. Zhaoyun, S., Liu, B., Xiaochen, M., Xiaofeng, L. *Optimization of Tandem Blade Based on Improved Particle Swarm Algorithm. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2016, vol. 2C. 12 p. DOI: 10.1115/GT2016-56901.

6. Zhou, Ch., Li, Z., Huang, S., Han, G., Lu, X., Zhao, Sh., Zhu, J. Numerical investigation on the aerodynamic performance and flow mechanism of a fan with a partial-height booster rotor. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 109, article id: 106411. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106411.

7. Zhao, B., Liu, B.-J. Effects of Relative Geometry Position of Forward and Aft Blades on Performance of Tandem Rotor. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 26-36.

8. Balalaiev, A. Flow simulation in an elementary tandem vane row of compressor. *Annali d'Italia*, 2020, no. 10-1, pp. 51–54.

Надійшла до редакції 31.05.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ДВУХРЯДНОМ ВЕНТИЛЯТОРЕ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. В. Балалаев, Е. В. Балалаева, Ю. Ю. Терещенко

Современные тенденции мирового авиастроения побуждают инженеров авиационных двигателей создавать и разрабатывать различные методы для повышения аэродинамических характеристик лопаточных машин. Насущная необходимость повышения экономичности двигателей нового поколения приводит к стремительному повышению степени двухконтурности двигателей, что требует разработки вентиляторов с большими диаметральными размерами и высоким аэродинамическим совершенством. Управление пограничным слоем в лопаточных машинах с помощью применения двухрядных лопаточных венцов - один из перспективных способов улучшения аэродинамических характеристик вентиляторов авиационных двигателей с большой степенью двухконтурности. Целью работы является оценка аэродинамических характеристик вентилятора с двухрядным рабочим колесом для двухконтурного двигателя. Исследовались два рабочих колеса вентилятора: однорядное и эквивалентное двухрядное (эквивалентность обеспечивалась равенством конструктивных углов входа и выхода потока и равенства хорды профилей). Лопаточный венец состоял из 33 лопаток, внешний диаметр на входе в рабочее колесо - 2,37 м, втулочный диаметр - 0,652 м. Моделирование течения проводилось в диапазоне осевой скорости на входе от 80 до 200 м/с при относительной частоте вращения ротора 0,65, 0,85 и 0,9. Для исследуемого двухрядного рабочего колеса вентилятора хорда первого ряда составляла 60% от суммарной хорды профиля, длина щелевого канала - 10% от суммарной хорды. Моделирование течения было выполнено с помощью численного эксперимента. При замыкании системы уравнений Навье-Стокса использовалась модель турбулентности SST Ментера. Расчетная сетка - неструктурированная, с адаптацией пограничного слоя. В работе показано, что применение двухрядного рабочего колеса позволит улучшить аэродинамические характеристики вентилятора. В результате проведенного исследования получено, что степень повышения давления в вентиляторе с двухрядным рабочим колесом возрастает от 0,32 до 20 % для режима работы при относительной частоте вращения $n=0,65$, $n=0,85$, и $n=0,9$ в диапазоне значений газодинамической функции расхода $q(\lambda) = 0,4 \dots 1$. Наибольший рост наблюдается на левых ветвях напорных линий. Полученные данные по КПД вентилятора с двухрядным рабочим колесом показали, что в диапазоне значений газодинамической функции расхода $q(\lambda)=0,4 \dots 0,6$ и $q(\lambda)=0,76 \dots 0,98$ КПД вентилятора с двухрядным рабочим колесом больше, чем КПД вентилятора с однорядным рабочим колесом, для значений газодинамической функции расхода $q(\lambda)=0,64 \dots 0,76$ - КПД вентилятора с двухрядным рабочим колесом меньше на 4%, чем КПД вентилятора с однорядным рабочим колесом.

Ключевые слова: вентилятор; моделирование течения; двухрядное рабочее колесо; КПД; степень повышения давления; эффективность; численный эксперимент.

SIMULATION OF FLOW IN A TANDEM FAN OF A TURBOFAN ENGINE

A. Balalaiev, K. Balalaieva, Yu. Tereshchenko

Modern trends in the global aircraft industry are prompting aircraft engine engineers to create and develop various methods to improve the aerodynamic characteristics of turbomachines. The urgent need to improve the efficiency of new generation engines leads to a rapid increase in the bypass ratio of engines, which requires the development of fans with large diametrical dimensions and high aerodynamic perfection. Boundary layer control in turbomachines using tandem blade rows is one of the most promising ways to improve the aerodynamic characteristics of aircraft engine fans with a high bypass ratio. The work aims to evaluate the aerodynamic characteristics of a fan with a tandem impeller for a turbofan engine. Two fan impellers were investigated: a single-row and an equivalent tandem-row (the equivalence was ensured by the equality of the structural angles of the flow inlet and outlet and the equality of the chord of the profiles). The blade row consisted of 33 blades, the tip diameter at the inlet to the impeller was 2.37 m, the hub diameter was 0.652 m. The flow was simulated in the range of axial velocity at the inlet from 80 to 200 m/s at a relative rotor speed of 0.65, 0.85, and 0.9. For the investigated tandem fan impeller, the chord of the first row was 60% of the total chord of the profile, the length of the slotted channel was 10% of the total

chord. The flow was simulated using a numerical experiment. When closing the system of Navier-Stokes equations, Menter's SST turbulence model was used. The computational grid is unstructured, with an adaptation of the boundary layer. The work shows that the use of a tandem impeller will improve the aerodynamic characteristics of the fan. As a result of the study, it was found that the pressure ratio in a fan with tandem impeller increases from 0.32 to 20% for an operating mode at a relative rotor speed of $n=0.65$, $n=0.85$, and $n=0.9$ in the range of values of the gas-dynamic flow rate function $q(\lambda)=0.4\dots 1$. The greatest growth is observed on the left branches of the pressure lines. The obtained data on the efficiency of a fan with a tandem impeller showed that in the range of values of the gas-dynamic flow rate function $q(\lambda)=0.4\dots 0.6$ and $q(\lambda)=0.76\dots 0.98$ a tandem impeller is higher than the efficiency of a fan with a single-row impeller, for values of the gas-dynamic flow function $q(\lambda)=0.64\dots 0.76$ - the efficiency of a fan with a tandem impeller is 4% less than the efficiency of a fan with a single-row impeller.

Keywords: fan; flow modeling; tandem impeller; efficiency; pressure ratio; efficiency; numerical experiment.

Балалаев Антон Валерьевич – ассистент кафедры механики, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Балалаева Екатерина Викторовна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Терещенко Юрий Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Anton Balalaiev – Assistant of Mechanics Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: avbalalaev@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3603-4512, Scopus Author ID: 56955689800.

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>

Yuriy Tereshchenko – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor of Dept. of aviation engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: Terj@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1908-0923, Scopus Author ID: 57194568327, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=-Gy9r3sAAAAJ>