

УДК 621.452.32.03.053:519.876.5

doi: 10.32620/aktt.2023.4.10

Р. В. МАЙБОРОДА

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ МОТОГОНДОЛИ НА СИЛУ ТЯГИ ВЕНТИЛЯТОРНОГО КОНТУРУ ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНОЇ ПРИСТАВКИ

Предметом дослідження є процес взаємодії мотогондולי триконтурного турбореактивного двигуна і турбовентиляторної приставки. **Об'єктом** дослідження є модель циліндричної мотогондולי і вентиляторна частина робочого колеса турбовентиляторної приставки. **Ціллю** роботи є оцінка впливу мотогондולי на силу тяги вентиляторного контуру триконтурного турбореактивного двигуна з урахуванням впливу роботи турбовентиляторної приставки. **Задачі**: провести моделювання обтікання мотогондולי з турбовентиляторною приставкою та без турбовентиляторної приставки; розрахувати реактивну силу тяги турбовентиляторної приставки. Дослідження проводились **методом** чисельного експерименту. Система рівнянь Нав'є-Стокса замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST Gamma Theta Transitional №4. **Результати** дослідження показали, що реактивна сила тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки зростає на 0,87-6,15% при режимах роботи на висоті 0 км, 9 км, 11 км та діапазоні чисел Маху на вході від 0,2 до 0,5. При обтіканні мотогондולי без урахування впливу турбовентиляторної приставки характерно, що поле швидкості на вході рівномірне, окрім зони з примежовим шаром близько поверхні мотогондולי. Однак, при роботі турбовентиляторної приставки картина обтікання радикально змінюється і товщина примежового шару зменшується та потік перед вентилятором має нерівномірний характер. Характерна особливість турбовентиляторної приставки, яка пов'язана з нагрівом проміжного корпусу між турбінним і вентиляторним корпусом позитивно впливає на зменшення товщини примежового шару, нагрів стінки сприяє підвищенню швидкості загальмованого, унаслідок сил в'язкості, потоку. Наявність примежового шару на мотогондолі не чинить негативного впливу на течію у вентиляторному контурі турбовентиляторної приставки і вентилятор турбовентиляторної приставки не чинить негативного впливу на газогенератор двигуна. **Наукова новизна та практична значимість роботи** полягає в отриманні нових даних щодо впливу мотогондולי на силу тяги вентиляторного контуру триконтурного турбореактивного двигуна з урахуванням впливу роботи турбовентиляторної приставки. Отримані результати можна використати при оптимізації турбовентиляторної приставки триконтурного турбореактивного двигуна.

Ключові слова: триконтурний двигун; турбовентиляторна приставка; мотогондолі; ступінь підвищення тиску; температура; реактивна тяга; вентиляторний контур; математичне моделювання.

Вступ

Зазвичай, в конструкції турбореактивного дво-контурного двигуна (ТРДД) є вузол вентилятора, який розташований в передній частині двигуна. Повітряний потік попадає на вхід у вентилятор із атмосфери. Така схема двигунів досить розповсюджена і має досить високі експлуатаційні характеристики. Але недоліками розташування вентилятора перед газогенератором є те, що кінематика потоку за вентилятором носить суттєвий вплив на роботу газогенератора.

При роботі вентилятора в умовах зриву потоку при обтіканні можуть з'являтися зривні зони, які будуть обертатися разом із ротором вентилятора та впливати на погіршення кінематики течії у наступних ступенях компресора. Також, при роботі в умовах зриву можуть бути зриви на окремих лопатках, що призведе до зниженої швидкості у сліді за вентилятором і вплине на течію у міжлопаткових каналах

наступних ступенів компресора, на окремих лопатках течія буде поступати не під оптимальним кутом атаки. Це, в свою чергу призведе до погіршення характеристики компресора і може визвати помпаж компресора.

Розташування вентилятора за схемою двигуна з турбовентиляторною приставкою дозволить позбутися впливу на течію у газогенераторі, що позитивно вплине на характеристики газогенератора. Однак, перед вентилятором турбовентиляторної приставки буде розташовано мотогондолу, яка, можливо, буде впливати на характеристику турбовентиляторної приставки.

На сьогоднішній день, на жаль, досліджень характеристик двигунів з турбовентиляторною приставкою досить обмежена кількість [1-5]. Питання впливу мотогондולי на течію у вентиляторі турбовентиляторної приставки було досліджено в роботі [1] тільки аналітичним шляхом. В роботі [2] авторами

було проведено модельний експеримент, який виявив суттєвий вплив примежового шару на мотогондолі на течію у вентиляторі турбовентиляторної приставки, але головним недоліком цього експерименту є те що, він проводився на моделях, які в 10-20 разів менше, ніж реальний двигун. Також в роботі [3] було проведено чисельний експеримент на повнорозмірній моделі мотогондoli. Модель мотогондoli складала 2,5 м, дослідження проводились при числах Маха $M=0,3 \dots 0,8$. Дослідження показали, що товщина витіснення примежового шару складає 8...11 мм. Але при цьому не враховувалась робота вентиляторної частини турбовентиляторної приставки. Досліджувались тільки характеристики примежового шару на мотогондолі, при цьому робота турбовентиляторної приставки не враховувалась.

Дослідження, які представлені в роботі [3] показують, що відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli може привести до досить суттєвого зниження профільного опору циліндричної мотогондoli на 15...60% при максимальному значенні коефіцієнту вдуву, при значеннях подовження мотогондoli газогенератора $\lambda=3$ та $\lambda=6$, при ступені двоконтурності від $m=2$ до $m=8$ та при відносній довжині газогенератора 0,8 та 0,4. З даних досліджень можна зробити висновок, що примежовий шар, який утворюється на поверхні мотогондoli досить суттєво впливає на аеродинамічний опір.

Також, слід відмітити, що автор наводить результати аналітичних досліджень [3], в яких показано, що примежовий шар, який утворюється на поверхні мотогондoli впливає на створення реактивної сили тяги вентиляторною частиною турбовентиляторної приставки. Так, при подовженні мотогондoli газогенератора $\lambda=3$ та діапазоні ступеня двоконтурності $m=2 \dots 8$ тяга вентиляторного контуру R_v зменшується на 6...2,5%. При подовженні мотогондoli газогенератора $\lambda=6$ та діапазоні ступеня двоконтурності $m=2 \dots 8$ тяга вентиляторного контуру R_v зменшується на 15...10%. Але всі дослідження проведені аналітичним шляхом, що є суттєвим недоліком таких досліджень. Отже, питання впливу мотогондoli на роботу турбовентиляторної приставки потребує подальших досліджень.

Метою роботи є оцінка впливу мотогондoli на силу тяги вентиляторного контуру триконтурного турбореактивного двигуна з урахуванням впливу роботи турбовентиляторної приставки.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження є модель циліндричної мотогондoli і вентиляторна частина робочого колеса турбовентиляторної приставки. На рис. 1 представ-

лено тривимірну модель мотогондoli разом з вентиляторним контуром турбовентиляторної приставки.

Моделювання течії проводилось шляхом розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса. Система рівнянь Нав'є-Стокса замикалась моделлю турбулентної в'язкості SST Gamma Theta Transitional №4. Вибір та обґрунтування моделі турбулентної в'язкості та топології розрахункової сітки приведено в роботі [6].

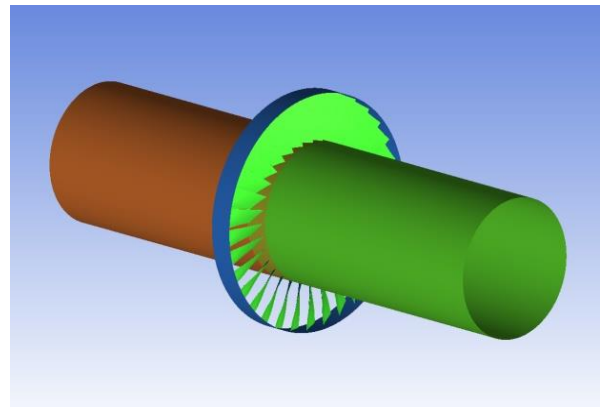


Рис. 1. Тривимірна модель мотогондoli разом з вентиляторним контуром турбовентиляторної приставки

Моделювання течії здійснювалось при різних режимах роботи: на висоті 11 км, 9, км та 0 км при стандартних атмосферних умовах. Частота обертання двоярусного робочого колеса дорівнює 2980 об/хв. Втулковий діаметр вентиляторного контуру – 0,725м, периферійний діаметр – 1,22 м, довжина мотогондoli до вхідного перерізу у вентиляторний контур – 3м. Тобто подовження мотогондoli становить $\lambda=4,13$.

Результати

Наступним кроком даного дослідження зроблена оцінка впливу мотогондoli на зміну сили тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки. Розрахунок сили тяги було проведено для наступних режимів роботи: висота польоту 0 км, 9 км, 11 км; числа Маха на вході: 0,2; 0,3; 0,5. Частота обертання турбовентиляторної приставки залишалась незмінною.

Сила тяги R розраховувалась за наступною формулою [5]:

$$R=(c_c - V) G + F_c (p_c - p_n),$$

де c_c – осьова складова швидкості на виході із вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки; V – швидкість польоту; G – витрата повітря через ве-

нтиляторний контур в одиницю часу; F_c – площа вихідного перерізу на виході із вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки; p_c – тиск на виході із вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки; p_n – атмосферний тиск.

На рис. 2–4 показано отримані залежності сили тяги від числа Маха на вході для двох варіантів розрахунку при режимі роботи на висоті 0 км, 9 км, 11 км відповідно.

На рис. 2–4 лінії синім кольором показують результати розрахунку сили тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки без урахування впливу мотогондולי, а червоним – результати розрахунку сили тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки з урахуванням впливу мотогондולי.

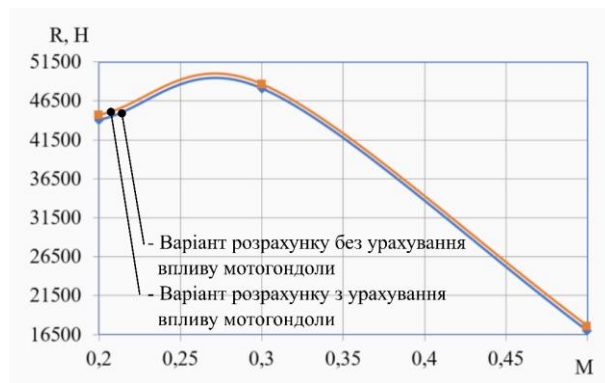


Рис. 2. Залежність сили тяги від числа Маха на вході при режимі роботи на висоті 0 км

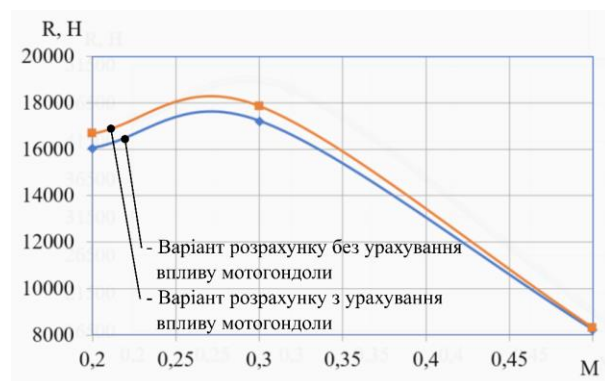


Рис. 3. Залежність сили тяги від числа Маха на вході при режимі роботи на висоті 9 км

Аналіз отриманих результатів залежності сили тяги від числа Маха показав, що мотогондولا впливає на силу тяги вентиляторного контуру. Цей вплив

можна відзначити як позитивний. При наявності мотогондולי сила тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки збільшується від 0,87% до 6,15%.

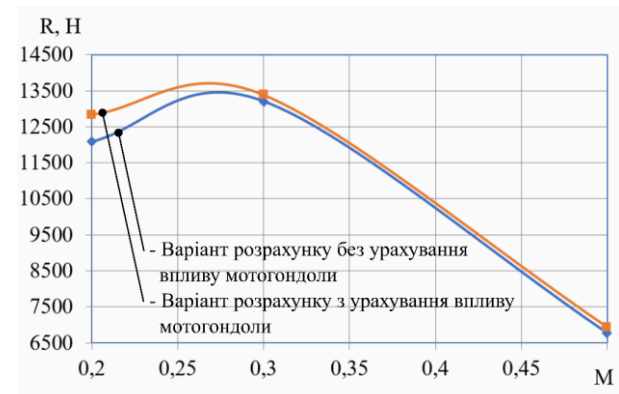


Рис. 4. Залежність сили тяги від числа Маха на вході при режимі роботи на висоті 11 км

Для режиму роботи на висоті 0 км відмінність у значеннях сили тяги становить від 1,15% до 3,75%. Для режиму роботи на висоті 9 км – від 0,87% до 3,75%. Для режиму роботи на висоті 11 км – від 1,27% до 6,15%.

Отриманий результат протирічить результатам, отриманим в роботі [3], де показано, що примежевий шар, який утворюється на поверхні мотогондולי спричинює зниження сили тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки. Можливо, такі відмінності у результатах можна пояснити різною температурою перед турбінним контуром турбовентиляторної приставки та геометричними розмірами досліджуваних моделей. Також, треба зазначити, що експериментальні дослідження, які були представлені у роботі [3] взагалі не враховували вплив роботи вентиляторного контуру і досліджувані моделі були в 10-20 разів менше, ніж реальний двигун. Також, дослідження примежевого шару, які представлені у роботі [3] для мотогондולי 2,5 м не враховували роботу турбовентиляторної приставки.

Розглянемо візуалізацію поля швидкості потоку перед входом у вентиляторний контур для двох варіантів: коли робота вентиляторного контуру не враховується і коли вентиляторний контур працює (рис. 5, 6). Розподіл швидкості при обтіканні мотогондולי на рис. 5 без урахування роботи турбовентиляторної приставки показує, що при обтіканні мотогондולי довжиною 3 м на вході у вентиляторний контур утворюється примежевий шар. Отримана візуалізація обтікання поверхні мотогондולי відповідає загальновідомим відомостям щодо теорії примежевого шару, яку досить повно розкрито в роботі [7]. Згідно з роботою [7] в реальних рідинах та газах завжди має місце прилипання рідини (газу) до стінок (в даному

випадку поверхня мотогондоли виступає як стінка), і це прилипання значно змінює картину обтікання. Внаслідок тертя, явище прилипання визиває заторможення прилеглого до стінок тонкого шару рідини (газу). В тонкому шарі швидкість течії збільшується від нуля на стінці (прилипання) до повного значення у зовнішньому потоці.

У зовнішньому потоці потік розглядають без сил тертя. Рис. 5 показує як змінюється картина ліній току від стінки (мотогондоли), де швидкість дорівнює нулю (синій колір) до швидкості основного потоку – це візуалізується зеленим, жовтим, жовтогарячим кольором. При переході від жовтогарячого до червоно кольору швидкість характеризується переходом до швидкості у зовнішньому потоці без сил тертя.

При обтіканні мотогондоли без урахування впливу турбовентиляторної приставки характерно, що поле швидкості на вході рівномірне, окрім зони з примежовим шаром близько поверхні мотогондоли.

Для порівняння на рис. 6, 7 показана візуалізація поля швидкості на поверхні мотогондоли в перерізі на вході у вентиляторний контур з урахуванням роботи турбовентиляторної приставки.

Порівняння отриманих візуалізацій на рис.5-7 показують, що при роботі турбовентиляторної приставки картина обтікання радикально змінюється і товщина примежового шару зменшується та потік перед вентилятором має нерівномірний характер.

Також, можна зробити висновок, що саме характерна особливість турбовентиляторної приставки,

яка пов'язана з нагрівом проміжного корпусу між турбінним і вентиляторним корпусом позитивно впливає на зменшення товщини примежового шару, нагрів стінки сприяє підвищенню швидкості загальмованого, унаслідок сил в'язкості, потоку. Нагрів стінки мотогондоли поблизу входу у вентиляторний контур та втулки вентиляторного контуру сприяє інтенсифікації енергії біля стінки, що позитивно впливає на силу реактивної тяги вентиляторного контуру.

Отже, можна зробити висновок, що мотогондола не буде чинити негативного впливу на течію у вентиляторному контурі турбовентиляторної приставки і вентилятор турбовентиляторної приставки не буде чинити негативного впливу на газогенератор двигуна.

Висновки

Проведена оцінка впливу мотогондоли на силу тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки. Показано, що реактивна сила тяги вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки зростає на 0,87-6,15% при режимах роботи на висоті 0 км, 9 км, 11 км та діапазоні чисел Маха на вході від 0,2 до 0,5.

Наявність примежового шару на мотогондолі не чинить негативного впливу на течію у вентиляторному контурі турбовентиляторної приставки і вентилятор турбовентиляторної приставки не чинить негативного впливу на газогенератор двигуна.

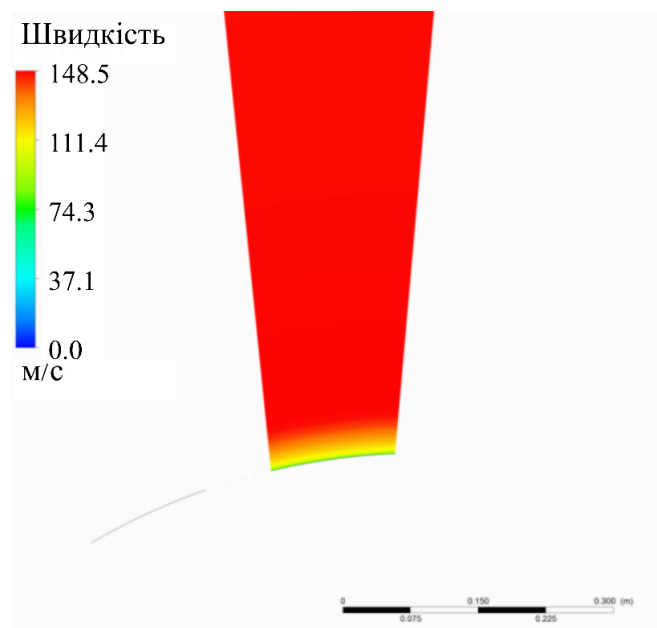


Рис. 5. Візуалізація поля швидкості на поверхні мотогондоли в перерізі на вході у вентиляторний контур без урахування впливу роботи турбовентиляторної приставки при роботі на висоті $H=11\,000\text{ м}$ та числі Маха на вході $M=0,5$

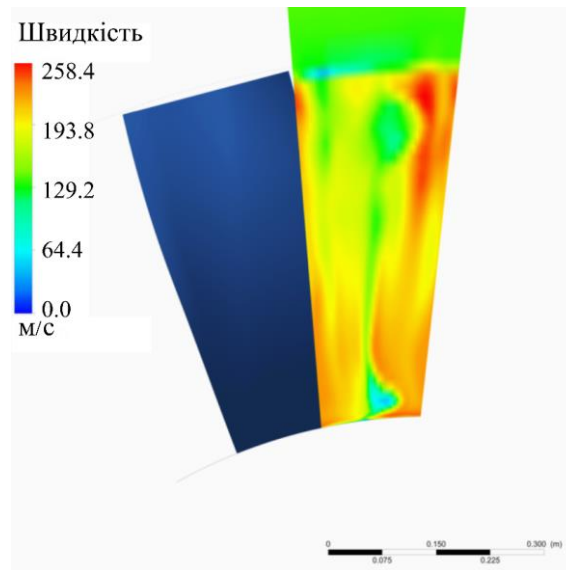


Рис. 6. Візуалізація поля швидкості на поверхні мотогондoli в перерізі на вході у вентилятор з урахуванням впливу турбовентиляторної приставки при роботі на висоті $H=11\,000\text{ м}$ і числі Маха на вході $M=0,5$

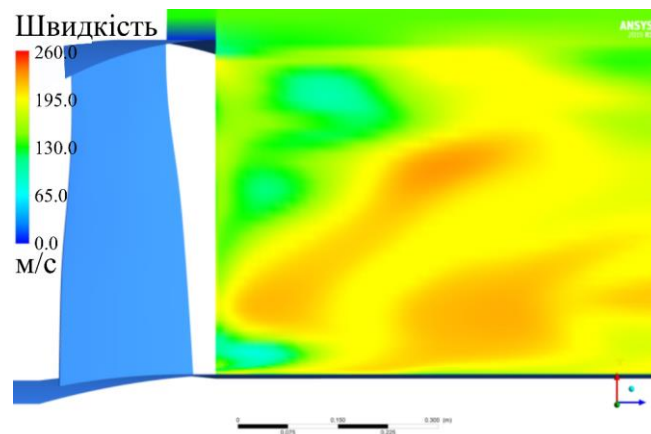


Рис. 7. Візуалізація поля швидкості на поверхні мотогондoli в меридіональному перерізі на вході у вентилятор з урахуванням впливу турбовентиляторної приставки при роботі на висоті $H=11\,000\text{ м}$ і числі Маха на вході $M=0,5$

Література

1. Профільний опір мотогондoli газотурбінного двигуна з турбовентиляторною приставкою [Текст] / Ю. Ю. Терещенко, Ю. М. Терещенко, К. В. Дорошенко, В. Ю. Усенко // Проблеми тертя та зношування. – 2018. – №3 (81). – С. 63-73.
2. Estimation of the aerodynamic characteristics of a stepped nacelle for the aircraft powerplant [Text] / Yu. Yu. Tereshchenko, Yu. M. Tereshchenko, A. Sklyarov [et al.] // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. № 7-102. – P. 27-31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.183403.
3. Терещенко, Ю. Ю. Аеротермогазодинамічна інтеграція багатоконтурного газотурбінного двигуна і мотогондoli авіаційної силової установки : монографія [Текст] / Ю. Ю. Терещенко. – К. : НАУ, 2019. – 116 с.
4. Терещенко, Ю. Ю. Аеродинамічний опір авіаційної силової установки з турбовентиляторною приставкою [Текст] / Ю. Ю. Терещенко, Ю. М. Терещенко І. О. Ластівка // Вісник двигунобудування. – 2019. – № 2. – С. 7–13.
5. Ефективна тяга та зовнішній опір авіаційної силової установки [Текст] / Ю. Ю. Терещенко, І. О. Ластівка, П. В. Гуменюк, Су Хунсян // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2020. – № 5 (165). – С. 61–67. DOI: 10.32620/akt.2020.5.08.
6. Майборода, Р. В. Моделювання течії в надзвуковій компресорній решітці [Текст] / Р. В. Майборода // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 4 спецвипуск 1 (181). – С. 31-35. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup1.05.

References

1. Tereshhenko, Yu. Yu., Tereshhenko, Yu. M., Doroshenko, K. V. & Usenko, V. Yu. Profil'ny'jopirmotogondoly` gazoturbinnogodvy`guna z turboventy`lyatornoyupry`stavkoyu [Profile resistance of the nacelle of a gas turbine engine with a turbofan attachment]. *Friction and wear problems*, 2018, no. 3, iss. 81, pp.63-73.
2. Tereshchenko, Yu. Yu., Tereshchenko, Yu. M., Sklyarov, A., Doroshenko, E. & Humeniuk, P. Estimation of the aerodynamic characteristics of a stepped nacelle for the aircraft powerplant. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 6, no. 7-102, pp. 27-31. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183403.
3. Tereshhenko, Yu. Yu. *Aerothermogazody`namichna integraciya bagatokonturnogo gazoturbinnogo dvy`guna i motogondoly` aviacijnoyi sy`lovoyi ustanovky* [Aerothermogasodynamic integration of a multi-circuit gas turbine engine and motor nacelle of an aircraft power plant]. Kyiv, NAU, 2019. 116 p.
4. Tereshhenko, Yu. Yu., Tereshhenko, Yu. M. & Lastivka, I. O. Aerody`namichny`j opir aviacijnoyi sy`lovoyi ustanovky` z turboventy`lyatornoyu pry`stavkoyu [Aerodynamic resistance of an aircraft power plant with a turbofan attachment]. *Visny`k dvy`gunobuduvannya – Herald of Aeroenginebuilding*, 2019, no. 2, pp. 7-13.
5. Tereshhenko, Yu. Yu., Lastivka, I. O., Gumenyuk, P. V. & Xunsyan, Su. Efekty`vna tyaga ta zovnishnij opir aviacijnoyi sy`lovoyi ustanovky` [Effective thrust and external drag of an aircraft power plant]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 5 (165), pp. 61-67. DOI: 10.32620/akt.2020.5.08.
6. Majboroda, R. V. Modelyuvannya techiyi v nadzvukoviy kompresorniy reshitti [Modeling of flow in a supersonic airfoil compressor cascade]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4 sup 1 (181), pp. 31-35. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup1.05.

Надійшла до редакції 15.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE NACELLE ON THE THRUST FORCE OF THE FAN CIRCUIT OF THE TURBO-FAN ATTACHMENT

Roman Majboroda

The **subject** of this study is the interaction between the engine nacelle of a three-circuit turbojet engine and a turbofan attachment. The **object** of this research is a model of a cylindrical engine nacelle and a fan part of the impeller of a turbofan attachment. The **aim** of this study was to evaluate the influence of the engine nacelle on the thrust force of the fan circuit of a three-circuit turbojet engine, taking into account the influence of the operation of the turbofan attachment. **Tasks**: to simulate the flow around the engine nacelle with a turbofan attachment and without a turbofan attachment; calculate the thrust force of the turbofan attachment. The studies were carried out using the **method** of numerical experiment. The system of Navier-Stokes equations was closed by the turbulent viscosity model SST Gamma Theta Transitional No. 4. The **results** of the study showed that the reactive thrust of the fan circuit of the turbofan attachment increases by 0.87-6.15% when operating at an altitude of 0 km, 9 km, 11 km and the range of Mach numbers at the input from 0.2 to 0.5. When flowing around the engine nacelle without taking into account the influence of the turbofan attachment, it is characteristic that the velocity field at the inlet is uniform, except for the zone with a boundary layer near the surface of the engine nacelle. However, during operation of the turbofan attachment, the flow pattern changes radically and the thickness of the boundary layer decreases, and the flow in front of the fan is uneven. A characteristic feature of the turbofan attachment, which is associated with the heating of the intermediate housing between the turbine and fan housings, has a positive effect on reducing the thickness of the boundary layer, wall heating contributes to an increase in the stagnant flow velocity due to viscous forces. The presence of a boundary layer on the engine nacelle does not adversely affect the flow in the fan circuit of the turbofan attachment, and the fan of the turbofan attachment does not adversely affect the engine gas generator. The **scientific novelty and practical significance** of this work lies in obtaining new data on the effect of the engine nacelle on the thrust force of the fan circuit of a three-circuit turbojet engine, taking into account the influence of the operation of the turbofan attachment. The results obtained can be used to optimize the turbofan attachment of a three-circuit turbojet engine.

Keywords: three-pass engine; turbofan attachment; nacelle; pressure rise; temperature; thrust; fan circuit; mathematical modeling.

Майборода Роман Валерійович – асп. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Roman Maiboroda – PhD student of the Department of Aircraft Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: mayboroda.r@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3381-2027.