

УДК 621.452.322.03.053:533.6.013.12

doi: 10.32620/aktt.2024.4sup1.02

**Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО, Ю. Ю. ТЕРЕЩЕНКО,
В. В. РАТИНСЬКИЙ, О. І. ЧУМАК***Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

ЗОВНІШНІЙ ОПІР МОТОГОНДОЛИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ВІДСМОКТУВАННЯМ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ

При створенні нових або модернізації вже існуючих зразків авіаційної техніки багато уваги приділяється економічним показникам її експлуатації. Одним з параметрів, що характеризує ці показники є витрата палива газотурбінними двигунами. В свою чергу на значення цього параметра суттєво впливає зовнішній аеродинамічний опір літака і зокрема мотогондoli двигуна. Відомо, що примежовий шар сформований на поверхні мотогондoli безпосередньо впливає на її аеродинамічний опір. Дане дослідження присвячене визначенню впливу відсмоктування примежового шару з зовнішньої поверхні мотогондoli газогенератора двоконтурного двигуна з задньою вентиляторною приставкою. Відсмоктування примежового шару здійснюється через отвори в поверхні мотогондoli газогенератора під дією перепаду тисків створеного втулковою частиною лопаткового вінця вентиляторного контуру. Примежовий шар відсмоктується у внутрішню порожнину мотогондoli і надходить на вхід до вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки де бере участь у створенні внутрішнього тяги турбовентиляторної приставки. Оцінювання впливу відсмоктування примежового шару на зовнішній опір здійснювалося на підставі відомих методів розрахунку турбулентних струменів та теорії примежового шару. Під час моделювання течії на поверхні моделей мотогондол з відсмоктуванням примежового шару та визначенні зовнішнього опору мотогондoli використовувався коефіцієнт відсмоктування C_δ , який залежить від геометричних розмірів відсмоктувальних отворів, параметрів потоків на поверхні мотогондoli і у відсмоктувальних каналах. Моделювання проводилося в діапазоні C_δ від 0 до 1. При коефіцієнті відсмоктування примежового шару $C_\delta = 1$ опір силової установки досягає найменшої величини і визначався опором вентиляторної приставки. Також був проведений порівняльний аналіз зовнішнього опору мотогондол звичайного компоновання двоконтурного турбореактивного двигуна (з переднім розташуванням вентилятора) і мотогондол з задньою турбовентиляторною приставкою. Як показали дослідження ефект від застосування відсмоктування примежового шару на поверхні мотогондoli газогенератора також залежить від ступеня двоконтурності турбовентиляторної приставки.

Ключові слова: Двоконтурний двигун; задня вентиляторна приставка; аеродинамічний опір; відсмоктування примежового шару; коефіцієнт відсмоктування; ступінь двоконтурності.

Вступ

Оптимальна інтеграції турбореактивного двигуна з турбовентиляторною приставкою і мотогондoli складної форми (ступінчастої мотогондoli) є однією з актуальних проблем [1, 4, 5]. Вирішення даної проблеми визначається узгодженням аеродинамічних характеристик мотогондoli і характеристик турбовентиляторної приставки [6, 7, 9]. Примежовий шар, який формується на поверхні мотогондoli газогенераторного модуля, значною мірою впливає на аеродинамічний опір мотогондoli та внутрішню тягу турбовентиляторної приставки. Зменшення опору тертя мотогондoli дозволило б суттєво знизити витрати палива, що дало б можливість збільшити швидкість і дальність польоту [2].

Постановка задачі дослідження

Основною метою дослідження є узгодження аеродинамічних характеристик мотогондoli з характеристиками задньої турбовентиляторної приставки та параметрами примежового шару, який відсмоктується з поверхні мотогондoli газогенератора.

Результати

Схему компоновки мотогондoli та двоконтурного турбореактивного двигуна із задньою турбовентиляторною приставкою зображено на рис.1. Втулкова частина лопаткового вінця вентиляторного контуру забезпечує відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli газогенератора.

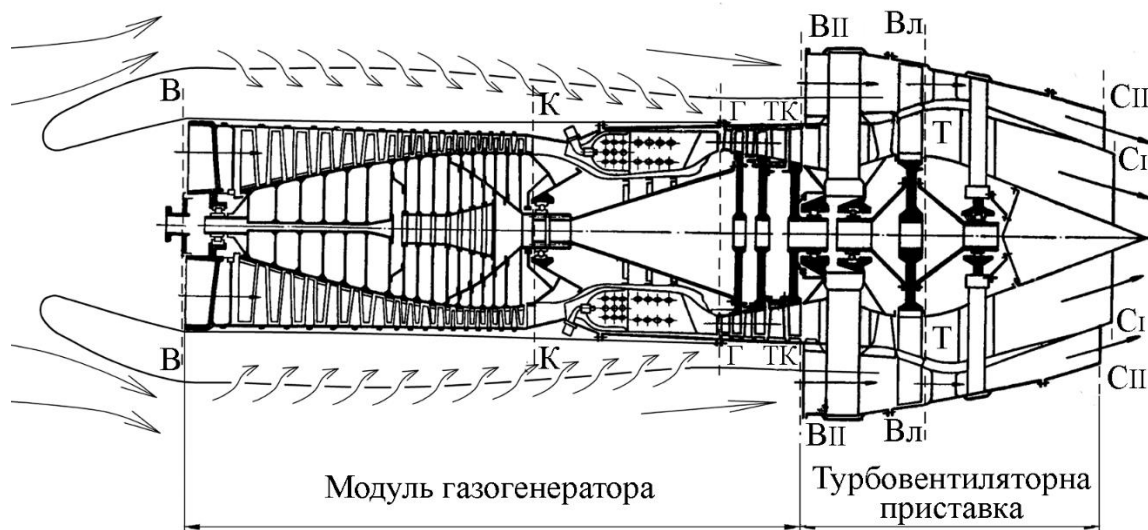


Рис. 1. Схема відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli ГТД з турбовентиляторною приставкою

Під дією перепаду тисків примежовий шар через отвори в поверхні мотогондoli газогенератора відсмоктується у внутрішню порожнину мотогондoli і надходить на вхід до вентиляторного контуру турбовентиляторної приставки, як показано на рис. 2.

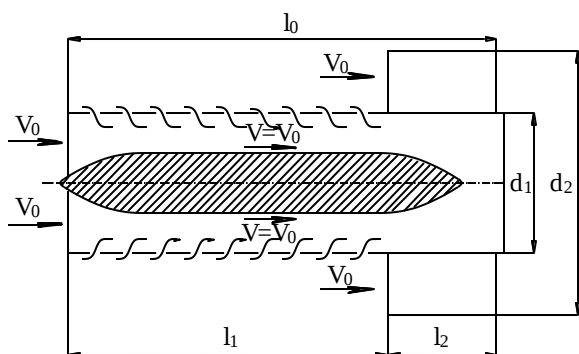


Рис. 2. Схема мотогондoli з відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli газогенератора через отвори

Для оцінки впливу відсмоктування примежового шару на зовнішній опір мотогондoli силової установки і визначення оптимальних значень коефіцієнту відсмоктування використовується теорія примежового шару і відомі методи розрахунку турбулентних струменів, що базуються на результатах експериментальних досліджень пристінних струменів [2, 3, 7].

Для аналізу вважаємо, що інтегральні характеристики примежового шару, а саме товщина витіснення та товщина втрати імпульсу пов'язані з його товщиною співвідношеннями [7]:

$$\delta_m^* = \delta_m \frac{1}{(n+1)}; \quad \delta_m^{**} = \delta_m \frac{n}{(n+1)(n+2)}.$$

Профілі швидкості можуть бути задані у вигляді [7]:

$$W_m = \frac{2,17 W_b h \left(\frac{1}{n} \right)^4}{x^\psi},$$

де ψ - показник, що характеризує зміну швидкості вздовж обтічної поверхні.

Товщину примежового шару на поверхні мотогондoli можна визначити за рівнянням [7]:

$$\frac{\delta}{l} = 0,37 (Re_l)^{-1/5},$$

де δ - товщина примежового шару;

l - довжина мотогондoli газогенераторного модуля для якої розраховується примежовий шар.

Число Рейнольдса визначаємо по наступній залежності

$$Re_l = \frac{V \cdot l}{\nu},$$

де V - швидкість потоку;

ν - кінематична в'язкість повітря.

Задача розрахунково-експериментального дослідження впливу управління примежовим шаром на аеродинамічний опір ступінчастої мотогондoli газотурбінного двигуна з турбовентиляторною приставкою здійснювалась шляхом моделювання течії на поверхні моделей мотогондол з відсмоктуванням примежового шару.

Параметром, який характеризує інтенсивність відсмоктування примежового шару, є коефіцієнт відсмоктування, який є відношенням маси частини примежового шару, що відсмоктується, до маси повітря, що відповідає товщині витіснення примежового шару

$$C_{\delta} = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot \sum \Delta}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \delta^*},$$

де δ^* – товщина витіснення примежового шару;

ρ_0 – густина газу у ядрі потоку;

c_0 – швидкість газу у ядрі потоку;

Δ – лінійний розмір одиничного отвору для відсмоктування примежового шару;

z – кількість отворів для відсмоктування примежового шару на поверхні моделі мотогондoli;

c_s – швидкість газу в каналах для відсмоктування примежового шару;

ρ_s – густина газу в каналах.

Зовнішній опір силової установки з турбовентиляторною приставкою визначається за формулами.

$$X_{\text{ТРГД}\delta} = \frac{\rho V^2}{2} \pi [C_{X_{\text{ГД}}} d_1 l_1 + C_{X_{\text{ТВП}}} d_0 l_0 (1 - \bar{l})],$$

$$X_{\text{ТРДД}} = C_{X_0} \frac{\rho V^2}{2} \pi d_0 l_0.$$

Відносна зміна зовнішнього опору мотогондoli авіаційної силової установки з турбовентиляторною приставкою при використанні відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli газогенератора визначалася за формулою

$$\bar{X}_{\text{ТРГД}\delta} = \frac{X_{\text{ТРГД}\delta}}{X_{\text{ТРДД}}} = \left[\frac{C_{X_{\text{ГД}}} \bar{d}_1 \bar{l}_1 + C_{X_{\text{ТВП}}} (1 - \bar{l})}{C_{X_0}} \right],$$

де $\bar{d}_1 = \frac{d_1}{d_0}$ – відносний діаметр мотогондoli;

$\bar{l}_1 = \frac{l_1}{l_0}$ – відносна довжина мотогондoli;

$C_{X_{\text{ГД}}} = f(C_{\delta})$ – коефіцієнт аеродинамічного опору мотогондoli газогенератора з відсмоктуванням примежового шару.

При коефіцієнті відсмоктування примежового шару $C_{\delta} = 1$ практично весь опір мотогондoli визначається зовнішнім аеродинамічним опором мотогондoli турбовентиляторної приставки, тобто зовнішній опір силової установки досягає найменшої величини.

Зовнішній опір силової установки з турбовентиляторною приставкою при управлінні примежовим шаром на поверхні мотогондoli газогенератора визначався, використовуючи наступні формули

$$X_{\text{ГТ}} = 2C_{X_{\text{ГТ}}} (1 - C_{\delta}) \rho V^2 S_{\text{ГТ}} \bar{l}_{\text{ГТ}},$$

$$X_{\text{ТВП}} = 2C_{X_{\text{ТВП}}} \rho V^2 S_{\text{ТВП}} \bar{l}_{\text{ТВП}}.$$

$$\bar{X} = \left[\frac{C_{X_{\text{ГТ}}} (1 - C_{\delta}) \bar{d}_1 \bar{l}_1 + C_{X_{\text{ТВП}}} (1 - \bar{l})}{C_{X_0}} \right].$$

В приведених формулах:

$C_{X_{\text{ГТ}}}$ – коефіцієнт аеродинамічного опору мотогондoli газогенератора без управління примежовим шаром;

$C_{X_{\text{ТВП}}}$ – коефіцієнт аеродинамічного опору мотогондoli турбовентиляторної приставки;

C_{X_0} – коефіцієнт аеродинамічного опору мотогондoli силової установки з двоконтурним двигуном з переднім розташуванням вентилятора.

При $C_{\delta} = C_{\delta_{\text{opt}}}$ профільний опір мотогондoli газогенераторного модуля $X_{\text{ГТ}} = 0$. Тому відносний вплив відсмоктування примежового шару на зовнішній аеродинамічний опір мотогондoli можна оцінювати за формулою:

$$\bar{X} = \frac{C_{X_{\text{ТВП}}}}{C_{X_0}} (1 - \bar{l}).$$

Зовнішній аеродинамічний опір мотогондoli визначався з урахуванням впливу управління примежовим шаром на поверхні мотогондoli газогенератора на значення коефіцієнту профільного опору мотогондoli

$$X_{\Sigma} = 2\rho V^2 [C_{X_{\text{ГТ}}} (1 - C_{\delta}) S_{\text{ГТ}} \lambda_{\text{ГТ}} + C_{X_{\text{ТВП}}} S_{\text{ТВП}} \lambda_{\text{ТВП}}].$$

Залежність профільного опору циліндричної мотогондoli газогенератора від інтенсивності відсмоктування примежового шару та різних значень ступеня двоконтурності показана на рис. 3, 4.

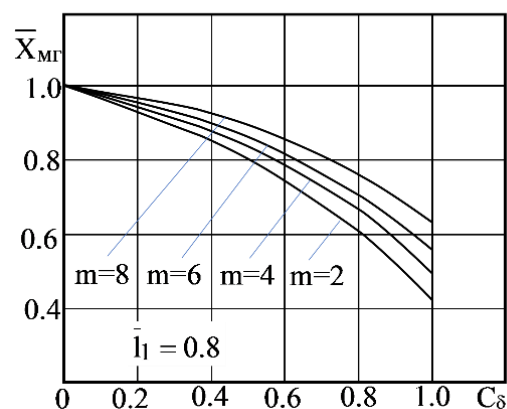


Рис. 3. Залежність профільного опору циліндричної мотогондoli від інтенсивності відсмоктування примежового шару при подовженні мотогондoli $\lambda=6$

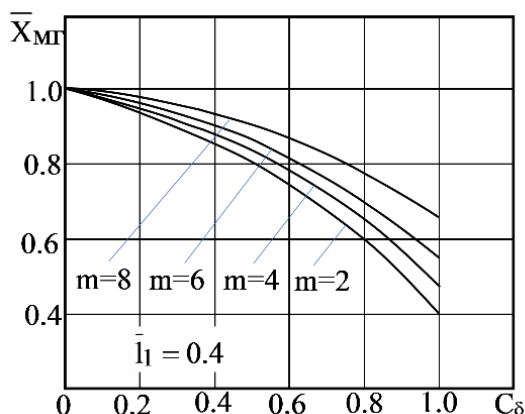


Рис. 4. Залежність профільного опору циліндричної мотогондoli від інтенсивності відсмоктування примежового шару при подовженні мотогондoli $\lambda=4$

Порівняння зовнішнього опору мотогондол звичайного конструювання двоконтурного турбореактивного двигуна і п'яти варіантів мотогондoli турбореактивного двигуна з турбовентиляторною приставкою показало, що ефект від застосування відсмоктування примежового шару на поверхні мотогондoli газогенератора залежить від ступеня двоконтурності турбовентиляторної приставки.

Висновки

Відсмоктування примежового шару з поверхні мотогондoli газогенератора турбореактивного двигуна з турбовентиляторною приставкою може забезпечити зменшення аеродинамічного опору авіаційної силової установки.

Внесок авторів: формулювання проблеми – Ю.М. Терещенко, розробка методики розрахунку Ю.Ю. Терещенко; аналіз результатів В.В. Ратинський, О.І.Чумак.

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

Робота має супутні дані у репозиторії даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Теорія теплових двигунів [Текст] : підручник / Ю.М. Терещенко, Л. Г. Бойко, С. О. Дмитриєв [та ін.] ; за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : Вища школа, 2001. – 382 с
2. Терещенко, Ю. Ю. Моделювання течії на пластині з відсмоктуванням примежового шару [Текст] / Ю. Ю. Терещенко, Ю. М. Терещенко, К. В. Дорошенко // Проблеми тертя та зношування. – 2019. - № 1 (82). – С. 52-57.
3. 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.
4. Інтеграція авіаційних силових установок літальних апаратів [Текст] : підручник / Ю. М. Терещенко [та ін.] ; за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : НАУ-друк, 2009. – 344 с.
5. Терещенко, Ю. Ю. Перспективи створення авіаційних двигунів з турбовентиляторною приставкою [Текст] / Ю. Ю. Терещенко, К. В. Дорошенко, & Ю. М. Терещенко // Вісник інженерної академії України. – 2017. – №3. – С.28–31.
6. Теорія теплових двигунів: Навчальний посібник [Текст] / Ю. М. Терещенко, М. М. Мітрахович, В. О. Богуслаєв [та ін.] ; за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : НАУ. – 2021. – 208с.
7. Терещенко, Ю. Ю. Аеротермогазодинамічна інтеграція багатоконтурного газотурбінного двигуна і мотогондoli авіаційної силової установки [Текст] : монографія / Ю. Ю. Терещенко. – К. : НАУ. – 2019. – 116 с.
8. Thrust and drag: its prediction and verification [Text] / E. E. Covert, C. R. James, W. F. Kimzey [et al.] // Progress in astronautics and aeronautics-AIAA. – 1985. – 98 p. DOI: 10.2514/4.865732.
9. Haar, D. Engine Integration Based on Multi-Disciplinary Optimisation Technique [Text] / D. Haar, & J. Brezillon // 11th ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS). – 2011. – 8 p.

References

1. Tereshhenko, Yu. M., Bojko, L. G., & Dmy`triyev, S. O. *Teoriya teplovy`x dvyy`guniv* [Theory of heat engines]. Kyiv, Vy`shha shkola - Higher School. Publ., 2001. 382 p.
2. Tereshchenko, Yu. Yu., Tereshchenko, Yu. M., & Doroshenko, K. V. Modelyuvannya techiyi na plastyni z vidsmoktuvannyam pryvezhovoho sharu [Modeling flow on a plate with boundary layer suction]. *Problemy tertya ta znoshuvannya - Problems of Friction and Wear*, 2019, no. 1(82), pp. 52-57.
3. Tereshchenko, Yu. Yu., Tereshchenko, Yu. M., Doroshenko, K. V., & Usenko, V. Yu. Profil'nyy opir motohondoly hazoturbinnoho dvyhuna z turboventylyatomoyu prystavkoyu [Profile resistance of the nacelle of a gas turbine engine with a turbofan attachment]. *Problemy tertya ta znoshuvannya - Problems of Friction and Wear*, 2018, no. 3(81), pp. 63-73.
4. Tereshhenko, Yu. M., Kuly`k, M. S., Panin, V. V. *Integraciya aviacijny`x sy`lovy`x ustanovok lital'ny`x aparativ* [Integration of aircraft power plants]. Kyiv, Vy`d-vo Nacz. aviacz. un-tu «NAU-druk» - National Aviation University publishing "NAU-print", 2009. 344 p.
5. Tereshchenko, Yu. Yu., Doroshenko, K. V., & Tereshchenko, Yu. M. Perspektyvy stvorenniya aviatsiynykh dvyhuniv z turboventylyatomoyu prystavkoyu [Prospects for creating aircraft engines with a turbofan attachment]. *Visnyk inzhenernoyi akademiyi Ukrayiny - Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2017, no. 3, pp. 28-31.
6. Tereshhenko, Yu. M., Mitrahovych, M. M., Boguslayev, V. O., Kravchenko, I. F., & Tereshhenko, Yu. Yu. *Teoriya teplovy`x dvyy`guniv: Navchal'ny`j posibnyk* [Theory of heat engines]. Kyiv, Vy`d-vo Nacz. aviacz. un-tu «NAU-druk» - National Aviation University publishing "NAU-print", 2021. 208 p.
7. Tereshhenko, Yu. Yu. *Aerothermogazody`namichna integraciya bagatokonturnogo gazoturbinnogo dvyy`guna i motogondoly`aviacijnoyi sy`lovoi ustanovky* [Aerothermogasodynamic integration of a multi-circuit gas turbine engine and motor nacelle of an aircraft power plant]. Kyiv, Vy`d-vo Nacz. aviacz. un-tu «NAU-druk» - National Aviation University publishing "NAU-print", 2019. 116 p.
8. Covert, E. E., James, C. R., Kinizey, W. F., Richey, G. K., & Rooney, E. C. Thrust and drag: its prediction and verification. *Progress in astronautics and aeronautics-ATAA*, 1985. 98 p. DOI: 10.2514/4.865732.
9. Haar, D., Brezillon, J. Engine Integration Based on Multi-Disciplinary Optimisation Technique. 11th ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS), 2011. 8 p.

Надійшла до редакції 15.07.2024, розглянута на редколегії 00.00.2024

EXTERNAL RESISTANCE OF A GAS TURBINE ENGINE NACELLE WITH BOUNDARY LAYER EXTRACTION

**Yurii M. Tereshchenko, Yurii Yu. Tereshchenko,
 Valery Ratynskyi, Oleg Chumak**

When creating new or modernizing existing aircraft models, a lot of attention is paid to the economic indicators of their operation. A parameter characterizing these indicators is the fuel consumption of gas turbine engines. In turn, the value of this parameter is significantly influenced by the external aerodynamic resistance of the aircraft and, in particular, the nacelle of the engine. The formed boundary layer on the surface of the nacelle directly affects its aerodynamic resistance. This study was devoted to determining the influence of the boundary layer suction from the outer surface of the engine nacelle of the gas generator of a bypass engine with a rear fan attachment. The suction of the boundary layer is carried out through the holes in the surface of the gas generator nacelle under the influence of the pressure drop created by the sleeve of the vane crown of the fan contour. The boundary layer is sucked into the internal cavity of the nacelle and enters the inlet into the fan contour of the turbofan attachment, where it participates in creating the internal thrust of the turbofan attachment. The influence of the boundary layer suction on the external resistance was evaluated on the basis of known methods for calculating turbulent jets and boundary layer theory. During the simulation of the flow on the surface of models of engine nacelles with boundary layer suction and the determination of the external resistance of the engine nacelle, the suction coefficient C_{δ} was used, which depends on the geometric dimensions of the suction holes and the flow parameters on the surface of the engine nacelle and in the suction channels. The simulation was performed in the range C_{δ} from 0 to 1. At the coefficient of suction of the boundary layer $C_{\delta} = 1$, the resistance of the power unit reached the smallest value and was determined by the resistance of the fan attachment. A comparative analysis of the external resistance of engine nacelles with the conventional configuration

of a bypass turbojet engine (with a front fan arrangement) and an engine nacelle with a rear turbofan attachment was also carried out. As previous studies have shown, the effect of applying a suction of the boundary layer on the surface of the nacelle of the gas generator also depends on the degree of bypass ratio of the turbofan attachment.

Keywords: Fanjet engine; rear fan attachment; aerodynamic resistance; boundary layer suction; suction coefficient; mathematical modeling; degree of degree of bypass ratio.

Терещенко Юрій Матвійович – д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України, зав. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Терещенко Юрій Юрійович – д-р техн. наук, доц. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Ратинський Валерій Валерійович – канд. техн. наук, доц. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Чумак Олег Іванович – старш. викл. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Yurii M. Tereshchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the State Prize of Ukraine, Head of the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yurii.tereshchenko@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4367-3232.

Yurii Yu. Tereshchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: 4513796@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1908-0923.

Valery Ratynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: valerii.ratynskyi@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0009-0006-3802-7841.

Oleg Chumak – Senior Lecturer at the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: oleg.chumak@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7410-5871.