

Р. Ю. ШАКАЛО, О. О. ЛАРІН, К. В. САВЧЕНКО

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЧАТКОВОГО ПАРАМЕТРУ СПРЯЖЕННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ ПОПАРНО БАНДАЖОВАНИХ ЛОПАТОК НА СТАТИЧНІ НАПРУЖЕННЯ У ПЕРІ ЛОПАТКИ

В роботі розглядаються результати експериментального дослідження впливу початкового параметру спряження бандажних полиць попарно бандажованих робочих лопаток на статичні напруження у кореновому перерізі пера лопаток, а також порівняння отриманих результатів з розрахунковими даними. Експериментальні дослідження проводились на установці, створеній в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. Для проведення розрахунків розроблено тривимірні скінченноелементні моделі попарно бандажованих робочих лопаток. Для моделювання початкового параметру спряження моделі розроблено як для лівих так і для правих лопаток – тобто розроблено пари лопаток. Робота проводилась для неохолоджуваних і для охолоджуваних попарно бандажованих робочих лопаток турбін. З метою верифікації розроблених моделей для кожної лопатки виконано модальний аналіз для визначення власних частот коливань та проведено порівняння з експериментальними даними, отриманими при виготовленні лопаток. Проведено аналіз розрахунково-експериментальних досліджень впливу початкового параметру спряження на статичні напруження у кореновому перерізі пера лопаток. Встановлено, що зі збільшенням початкового параметру спряження статичні напруження у кореновому перерізі лопаток збільшуються прямопропорційно. Також встановлено, що статичні напруження у пері для лівої та правої лопаток майже однакові при однаковому параметрі спряження, як для не охолоджуваних лопаток так і для охолоджуваних. Існує суттєва похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями, при цьому характер залежності напружень від початкового параметру схожий – прямолінійний. Похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями пояснюється тим, що при виготовленні лопаток мають місце відхилення від номінальних розмірів, а моделі побудовано по номінальним розмірам.

Ключові слова: попарно бандажовані лопатки, спряження полиць, демпфувальна здатність, статичні напруження

R. SHAKALO, O. LARIN, K. SAVCHENKO

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL IMPACT STUDY INITIAL PAIRING PARAMETER OF BANDAGE SHELVES PAIRS OF BANDED BLADES FOR STATIC STRESSES IN THE FEATHER OF THE SHOULDER BLADES

The paper discusses the results of an experimental study of the influence of the initial parameter of the conjugation of the bandage shelves of the pair-banded working blades on the static stresses in the root section of the blades, as well as the comparison of the obtained results with the calculated data. Experimental studies were carried out at the installation created at the Institute of Strength Problems named after H.S. Pysarenko of the National Academy of Sciences of Ukraine. For calculations, three-dimensional finite element models of paired working blades were developed. To simulate the initial conjugation parameter, the model was developed for both left and right blades - that is, pairs of blades were developed. The work was carried out for non-cooled and for cooled pair-banded working blades of turbines. In order to verify the developed models, a modal analysis was performed for each blade to determine the natural frequencies of oscillations and a comparison was made with the experimental data obtained during the manufacture of the blades. An analysis of computational and experimental studies of the influence of the initial conjugation parameter on static stresses in the root cross-section of the blade feather was carried out. It was established that with an increase in the initial conjugation parameter, the static stresses in the root cross-section of the blades increase in direct proportion. It was also established that the static stresses in the feather for the left and right vanes are almost the same with the same coupling parameter, both for uncooled blades and for cooled blades. There is a significant error between the experimental and calculated values, while the nature of the stress dependence on the initial parameter is similar - rectilinear. The error between the experimental and calculated values is explained by the fact that during the manufacture of the blades there are deviations from the nominal dimensions, and the models are built according to the nominal dimensions.

Keywords: pairwise banded blades, flange conjugation, damping capacity, static stresses

Мета та постановка задачі. Сучасні авіаційні газотурбіні двигуни (АГТД) мають високі питомі характеристики, які досягаються за рахунок підвищення ступеню стиснення у компресорі, підвищення температури газу перед турбіною, зменшення втрат у вузлах та інше. Одним з головних параметрів АГТД також є маса. Зменшення маси сучасних АГТД може відбуватися за рахунок застосування нових матеріалів, технологій виготовлення та за рахунок оптимізації конструкції. Однак підвищення параметрів та зменшення маси деталей призводить до збільшення напружень у деяких деталях та вузлах АГТД. Одними з таких деталей є робочі лопатки турбін, тому, що вони сприймають високі температурні,

відцентрові та динамічні навантаження, і саме робочі лопатки турбін здебільшого визначають ресурс АГТД, адже більшість відмов двигунів пов'язані з руйнуванням лопаток турбіни [1-5]. Відомо, що для підвищення надійності робочих лопаток впроваджують конструктивні, технологічні, експлуатаційні заходи.

Поличне бандажування лопаток робочих лопаток відноситься до конструктивних заходів оскільки внаслідок взаємних переміщень контактуючих поверхонь полиць при циклічному деформуванні лопаток зменшується напруження у пері, тому воно широко застосовується при проектуванні. Бандажування також зменшує перетікання газу через радіальний проміжок і

зменшує кінцеві втрати, що підвищує ефективність вузла. Основною умовою його функціонування є забезпечення гарантованого притиснення контактуючих поверхонь полиць або їх натягу на усіх режимах експлуатації двигуна.

Вивченням впливу умов спряження бандажних полиць на напружено-деформований стан лопаток турбін займається багато науковців. Так, у роботах [6-9] наведено результати дослідження впливу спряження бандажних полиць на напружений стан та на коливання лопаток, а також запропоновано шляхи для підвищення надійності і ресурсу лопаток. У роботах розглянуто як пакетне так і кільцеве бандажування. Проте питанню вивчення впливу умов спряження бандажних полиць на напружено-деформований стан попарно бандажованих лопаток приділяється мало уваги.

Однак попарне бандажування лопаток є особливим видом бандажування, коли використовуються тільки беззигові полиці. Частіше, такий спосіб бандажування використовується для лопаток із складеним ялинковим хвостовиком, коли в один паз диску встановлюється дві лопатки (умовно права та ліва лопатки). В цьому випадку джерелом конструкційного демпферування коливань лопаток є як бандажне, так і замкове з'єднання.

В практиці проектування АГТД на ДП «Івченко-Прогрес», широкого застосування знайшла схема попарного бандажування робочих лопаток турбін зі складеним ялинковим хвостовиком. Така схема застосовується на таких двигунах як: АИ-20, АИ-25, Д-36, Д-18, Д-436, АИ-322 та інші.

Відомо, що напруження у пері залежить від багатьох конструктивних та технологічних параметрів [10]. Одним з таких параметрів є – початковий параметр спряження бандажних полиць. Найбільші напруження у пері виникають, як правило, у кореновому перерізі [11] тому порівняння статичних напружень будемо проводити саме для коренового перерізу зі сторони спинки, оскільки в цьому місці зручніше встановлювати тензодатчики.

Метою роботи є встановлення експериментальних і розрахункових залежностей статичних напружень у кореновому перерізі пера від початкового параметру спряження бандажних полиць.

Експериментальне дослідження. Для проведення дослідження обрано неохолоджувані попарно бандажовані робочі лопатки третьої ступені турбіни АГТД АИ-25 та охолоджувані попарно бандажовані лопатки турбіни високого тиску АГТД Д-36. На рис. 1 показані обрані попарно бандажовані лопатки турбіни АГТД АИ-25 (а) та АГТД Д-36 (б).

Як було зазначено у [12] конструктивною особливістю таких лопаток є те, що в паз диска

ялинкового типу вільно встановлюється складений хвостовик, кожна половина якого має перо з беззиговою бандажною полицею. Очевидно, що після складання робочого колеса між контактними поверхнями бандажних полиць і хвостовиків будуть проміжки.

В умовах експлуатації під дією відцентрових сил відбувається притиснення контактних поверхонь полиць та хвостовиків між собою та з диском із зусиллям, при якому можна припускати їх абсолютно жорсткий зв'язок з диском. При цьому умови затиснення лопаток в диску, як правило, такі, що вони не перешкоджають відносному проковзуванню контактуючих поверхонь половинок хвостовика і бандажних полиць, внаслідок чого при циклічному деформуванні лопаток відбувається розсіювання енергії. Тобто замкове і бандажне з'єднання лопаток є природними конструкційними демпферами коливань.

Враховуючи той факт, що основною задачею роботи є визначення впливу початкового параметру спряження бандажних полиць на статичні напружень у кореновому перерізі пера лопатки були підготовані таким чином, щоб покроково відтворити початковий параметр від максимального до мінімального.

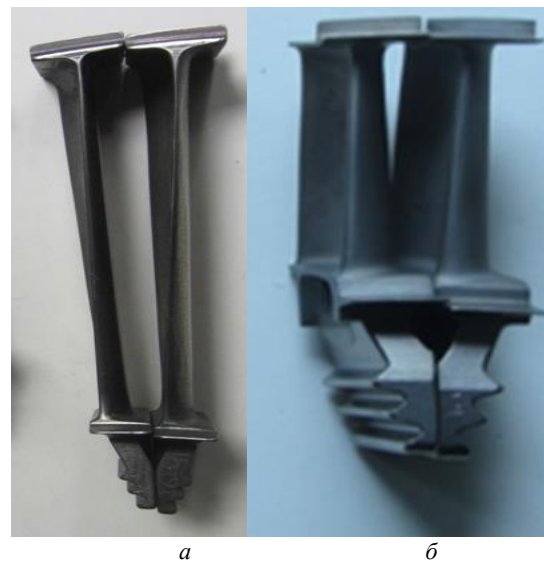


Рис. 1 – Попарно бандажовані лопатки турбін АГТД АИ-25 (а) та Д-36 (б)

На рис. 2, представлена схема визначення початкового параметру $\Delta_n = (\Delta_n' + \Delta_n'')$ по полицях попарно бандажованих лопаток. Зменшення початкового параметру досягалось послідовно.

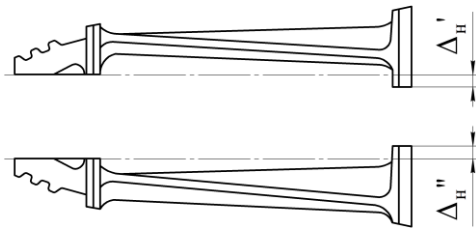


Рис. 2 – Схема визначення початкового натягу по полицях попарно бандажованих лопаток

Експериментальні дослідження обраних натурних лопаток проводилось наступним чином:

- 1) визначався початковий параметр спряження Δ_n ;
- 2) пара лопаток встановлювалась в гідрозажимі та стискається по ялинковому хвостовику;
- 3) ресструються статичні напруження згину $\sigma_{ст}$ в кореновому перерізі пера лопатки, які виникають внаслідок стискання контактних поверхонь бандажних полиць при відповідному значенні параметру Δ_n ;
- 4) здійснюється обробка торців бандажних полиць на однакову величину, що призводить до зміни параметрів Δ_n' та Δ_n'' та відповідно до зміни величини Δ_n ;
- 5) повторюються випробування у відповідності з пунктами 1-4.

Необхідно зазначити, що експериментальні дослідження проводились на установці, створеній в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України.

Розрахункові дослідження. Всі розрахункові дослідження проводились за допомогою програмного комплексу Ansys.

Для проведення розрахункових досліджень були розроблені тривимірні моделі обраних лопаток у системі Unigraphics NX, як лівих так і правих (рис.3).

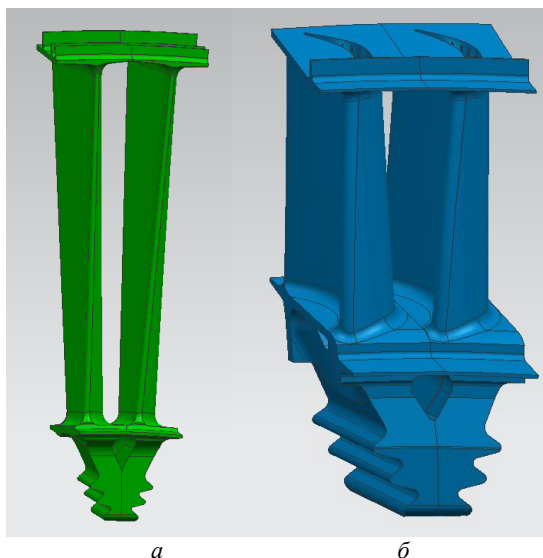


Рис. 3 – Моделі попарно бандажованих лопаток турбін АГТД АИ-25 (а) та Д-36 (б)

Для кожної лопатки виконано модальний аналіз для визначення власних частот коливань. Як відомо при виробництві лопаток контролюється частота першої згинальної форми, а отже можливо порівняти розрахункові та експериментальні дані з метою верифікації розроблених моделей [13;14]. Отримані дані наведені у таблиці 1.

Як видно з даних таблиці 1 похибка між експериментальною та розрахунковою частотою по першій згинальній формі коливань для неохолоджуваних робочих лопаток двигуна АИ-25 складає менше одного відсотка, що свідчить про коректність розроблених моделей.

Таблиця 1 – Частота першої згинальної форми лопаток

	АИ-25		Д-36	
	Ліва	Права	Ліва	Права
фекспер, Гц	375	377	2025	2040
фрзрах, Гц	373	374	2112	2160
Похибка	0,5%	0,75%	4,5%	5,5%

Для охолоджуваних робочих лопаток двигуна Д-36 похибка складає приблизно п'ять відсотків.

Така суттєва різниця похибки пояснюється більш складною конструкцією, та технологією виготовлення охолоджуваних лопаток. Враховуючи це отримана похибка для охолоджуваних лопаток вважається прийнятною, а отже і розроблені моделі коректними. Необхідно зазначити, що експериментальні частоти, котрі наведені у таблиці 1 визначені як середнє значення після контролю комплексу відповідних лопаток.

Для розрахункового визначення впливу початкового параметру спряження бандажних полиць на статичні напружень у пері, моделі лопаток були розроблені аналогічно з експериментальними дослідженнями. Тобто початковий параметр моделювався від найбільшого до найменшого. Значення початкового параметру в моделях повністю відповідали експериментальним.

За допомогою програмного комплексу Ansys розроблено скінченно-елементні моделі лопаток (рис. 4) та накладено граничні умови для розрахунку.

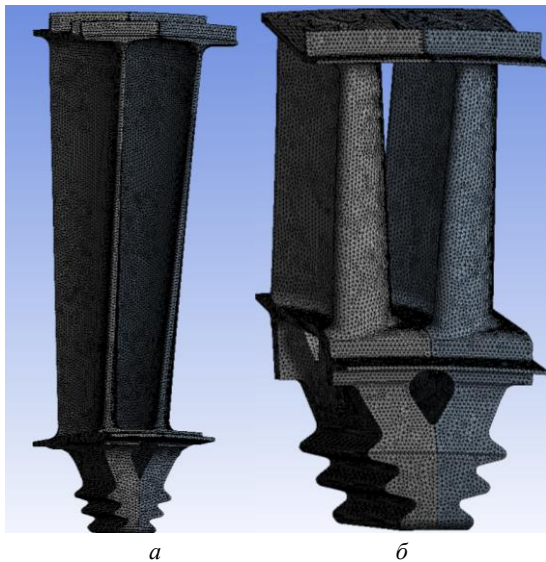


Рис. 4 – Скінченно-елементні моделі попарно бандажованих лопаток турбін АГТД АІ-25 (а) та Д-36 (б)

Кількість вузлів та елементів для необхідної пари лопаток склала 587201 та 388986 відповідно. Для охолоджуваної пари лопаток – 1325545 та 890102 відповідно.

З метою більш коректного вирішення контактної задачі по місцю моделювання початкового параметру Δ_n на бандажних полицях було покращено якість елементів (рис. 5). Контакт задано між двома торцями бандажних полиць по всій площині (Frictional). Враховуючи, що коефіцієнт тертя між торцями бандажних полиць несуттєво впливає на напруження у пері [15], коефіцієнт задано 0,17.

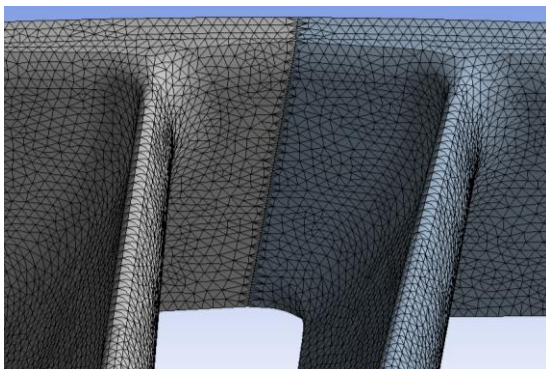


Рис. 5 – Скінченно-елементні моделі контакту бандажних полиць

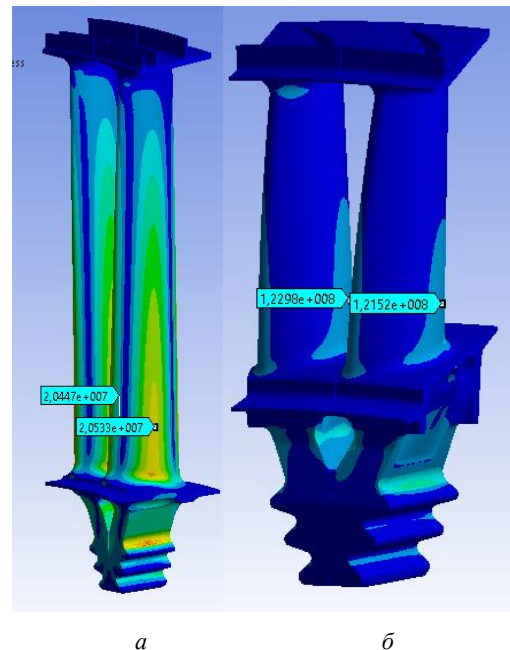


Рис. 6 – Місце визначення статичні напруження згину $\sigma_{ст}$ в лопатках турбін АГТД АІ-25 (а) та Д-36 (б)

Розрахункові статичні напруження згину $\sigma_{ст}$ в кореневому перерізі пера лопатки визначалися на тому ж радіусі, де при експерименті кріпився тензодатчик (рис. 6)

Для кожного початкового параметру спряження Δ_n були визначені експериментальні та розрахункові значення статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ як для лівої так і для правої лопаток. За результатами отриманих даних побудовані залежності статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δ_n (рис. 7-10).

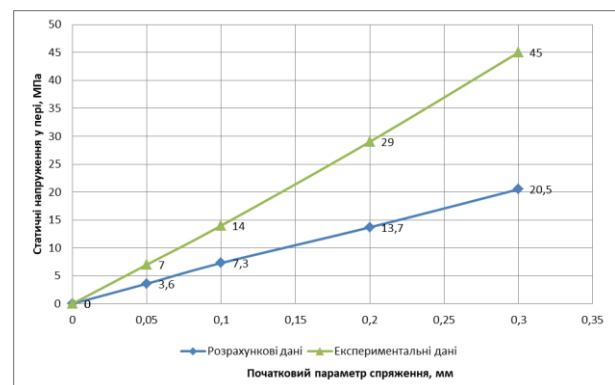


Рис. 7 – Залежність статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δ_n лівої лопатки АГТД АІ-25

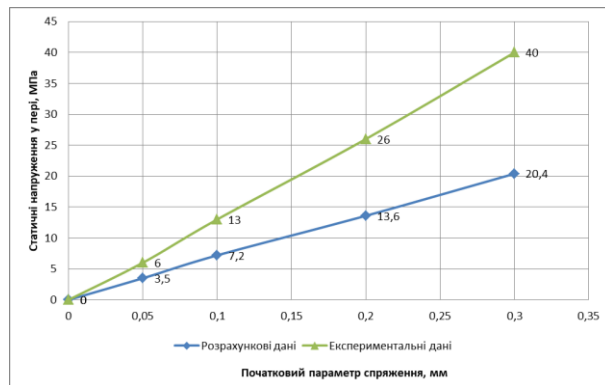


Рис. 8 – Залежність статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δ_n правої лопатки АГТД АІ-25

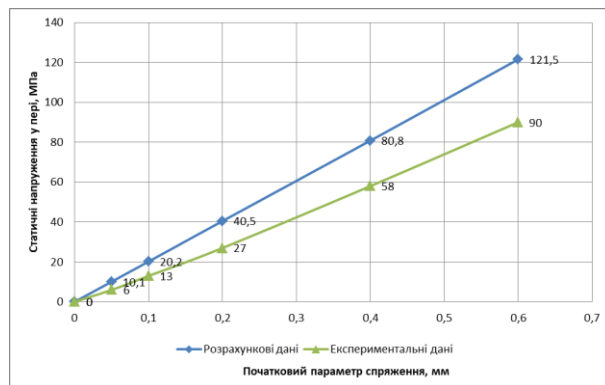


Рис. 9 – Залежність статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δ_n лівої лопатки АГТД Д-36

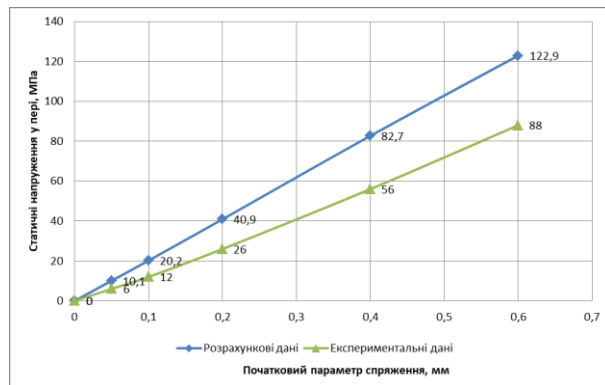


Рис. 10 – Залежність статичних напружень згину $\sigma_{ст}$ від початкового параметру спряження Δ_n правої лопатки АГТД Д-36

Висновки. Проведено експериментальні та розрахункові дослідження впливу початкового параметру спряження бандажних полиць на статичні напруження у кореновому перерізі пера лопаток. За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням початкового параметру статичні напруження збільшуються прямопропорційно. Статичні напруження у пері для лівої та правої лопаток майже однакові при однаковому параметрі спряження, як для не охолоджуваних лопаток так і для охолоджуваних. Існує суттєва похибка між

експериментальними та розрахунковими значеннями, при цьому характер залежності напружень від початкового параметру схожий – прямолінійний. Похибка пов'язана з тим, що розрахункові результати отримані у точці, а при експериментальному дослідженні – по базі тензодатчика.

Список літератури

1. Kulyk M. Thermocyclic fatigue and destruction of high pressure turbine blades in their critical sections / Kulyk M. Kovesnikov M. Petruk Y. Petruk B. Yakushenko O. // Transportation Research Procedia. - 2022.- Vol. 63. - P. 2812–2819. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.326>.
2. Kumari S. Failure analysis of gas turbine rotor blades / S. Kumari, D. Satyanarayana, M. Srinivas // Engineering Failure Analysis. - 2014. - Vol. 45. - P. 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.003>
3. Rani S. Failure investigations of a first stage Ni based super alloy gas turbine blade / S. Rani, A. Agrawal, V. Rastogi // Materials Today: Proceedings. - 2018. - Vol. 5 - P. 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.108>.
4. Madhavan S. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine / S. Madhavan, R. Jain, C. Sujatha, A. Sekhar // Engineering Failure Analysis. - 2014. - Vol. 46 - P. 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.021>.
5. Poursaeid E. Failure analysis of a second stage blade in a gas turbine engine / E. Poursaeid, M. Aienervavaie, M. R. Mohammadi // Engineering Failure Analysis. - 2008. - Vol. 15 - P. 1111–1129. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.020>
6. Придорожний П. П. Вплив монтажного натягу на напружено-деформований стан турбінної лопатки та втрату натягу по полицях у процесі експлуатації / П. П. Придорожний, О. Ст. Шереметьєв, А. П. Зінківський // Авіаційно-космічна техніка та технологія. - 2006. - №8 (34).
7. Pennacch P. A model to study the reduction of turbine blade vibration using the snubbing mechanism/ P. Pennacchi, S. Chatterton, N. Bachschmid, E. Pesatori, G. Turozzi // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2011. - Vol. 25 - P. 1260–1275 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.10.006>.
8. Воробійов Ю. С. Коливання бандажованого робочого колеса ВМД / Ю. С. Воробійов, К. Ю. Дьяконенко, В. Н. Романенко, С. Б. Кулішов, А. М. Скрицький // Авіаційно-космічна техніка та технологія - 2006 - №8 (34)
9. Меркулов Ст. М. Про вплив параметрів бандажування на надійність та ресурс робочих лопаток турбін/В. М. Меркулов, Ю. Ст. Якушев, М. Н. Федорченко, О. П. Зінківський // Авіаційно-космічна техніка та технологія. - 2009. - №10 (67).
10. Токар І. Г. До питання про можливості підвищення демпфуючої здатності робочих лопаток сучасних двигунів/І. Г. Токар А. П. Зінківський, В. В. Матвеев // Проблеми міцності. - 2003. - №4. - С. 58–6
11. Кулик М. С. Дослідження напруженого і граничного стану робочої лопатки турбіни від дії газових та інерційних сил / М. С. Кулик, Т. В. Доник // Авиационно-космическая техника и технология. - 2009. - №9 (66).
12. Зінківський А. П. Дослідження впливу гнучкості пера на оптимальні умови спряження полиць попарно бандажованих лопаток турбін. / Зінківський А. П., Меркулов В. М., Токар І. Г., Деркач О. Л., Шакало Р. Ю. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2020. - №7 (167). - С. 41–49. <https://doi.org/10.32620/akt.2020.8.06>.
13. Pridorozhnyi R. P. Calculation-and-experimental investigation on natural frequencies and oscillation modes of pairwise-shrouded cooled turbine blades./ Pridorozhnyi R. P., Zinkovskii A. P. Merkulov V. M., Sheremet'ev A. V., Shakalo R. Yu // Strength of Materials. - 2019. - Vol. 51. - No.6. - P.C. -827. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00133-6>.
14. Шакало Р. Ю. Демпфирование колебаний охлаждаемых попарно бандажированных рабочих лопаток турбин / Шакало Р. Ю., Придорожний Р. П., Якушев Ю. В., Меркулов В. М., Зінківський А. П. // Авиационно-

- космическая техника и технология. - 2019. - № 7 (159). - С. 109–113 <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.7.15>.
15. Придорожний Р. П. Моделивання контактної взаємодії та розрахунок напруг у зоні контакту бандажних полиць та замкового з'єднання лопатки турбіни / Р. П. Придорожний, А. В. Шереметєв, Ю. В. Якушев // Вісник двигунобудування. - 2004. - №4. - С. 72-76..
- References (transliterated)**
1. Kulyk M. Thermocyclic fatigue and destruction of high pressure turbine blades in their critical sections / Kulyk M. Koveshnikov M. Petruk Y. Petruk B. Yakushenko O. // Transportation Research Procedia. - 2022. - Vol. 63. - P. 2812–2819. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.326>.
 2. Kumari S. Failure analysis of gas turbine rotor blades / S. Kumari, D. Satyanarayana, M. Srinivas // Engineering Failure Analysis. - 2024. - Vol. 45. - P. 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.003>
 3. Rani S. Failure investigations of a first stage Ni based super alloy gas turbine blade / S. Rani, A. Agrawal, V. Rastogi // Materials Today: Proceedings. - 2018. - Vol. 5 - P 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.108>.
 4. Madhavan S. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine / S. Madhavan, R. Jain, C. Sujatha, A. Sekhar // Engineering Failure Analysis. - 2014. - Vol. 46 - P. 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.021>..
 5. Poursaeid E. Failure analysis of a second stage blade in a gas turbine engine / E. Poursaeid, M. Aienaravaie, M. R. Mohammadi // Engineering Failure Analysis. - 2008. - Vol. 15 - P. 1111–1129. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.020>
 6. Pridorozhnyi R. P. Vliyaniye montazhnogo natyaga na napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye turbinnoj lopatki i poteryu natyaga po polkam v processe ekspluatatsii / R. P. Pridorozhnyi, A. V. Sheremetev, A. P. Zinkovskij // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2006. - №8 (34).
 7. Pennacchi P. A model to study the reduction of turbine blade vibration using the snubbing mechanism/ P. Pennacchi, S. Chatterton, N. Bachschmid, E. Pesatori, G. Turozzi // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2011. - Vol. 25 - P. 1260–1275 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.10.006>.
 8. Vorobev Yu. S. Kolebaniya bandazhiro-vannogo rabocheho koleasa GTD / Yu. S. Vorobev, K. Yu. Dyakonenko, V. N. Romanenko, S. B. Kulishov, A. N. Skrickij // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2006. - №8 (34).
 9. Merkulov V. M. O vliyaniy parametrov bandazhirova-niya na nadezhnost i resurs rabochih lopatok tur-bin / V. M. Merkulov, Yu. V. Yakushev, N. N. Fedorchenko, A. P. Zinkovskij // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2009. - №10 (67).
 10. Tokar I. G. K voprosu o vozmozhnostyah povysheniya dempfiruyushej spo-sobnosti rabochih lopatok sovremennyh dvigate-lej / I. G. Tokar, A. P. Zinkovskij, V. V. Matveev // Problemy prochnosti. - 2003. - №4 - P. 58-68.
 11. Kulik M. S. Doslidzhennya napruzhnogo i granichnogo stanu robochoyi lopatki turbini vid diy gazovih ta inercijnih sil / M. S. Kulik, T. V. Donik // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2009. - №9 (66).
 12. Zinkovskij A. P. Doslidzhennya vplivu gnuchkos-ti pera na optimalni umovi spryazhennya polic po-parno banda zhovanih lopatok turbin./ Zinkovskij A. P., Merkulov V. M., Tokar I. G., Der-kach O. L., Shakalo R. Yu. // Aviacijno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya. - 2020. - №7 (167) - P.41-49 <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.8.06>.
 13. Pridorozhnyi R. P. Calculation-and-experimental investigation on natural frequencies and oscillation modes of pairwise-shrouded cooled turbine blades./ Pridorozhnyi R. P., Zinkovskii A. P. Merkulov V. M., Sheremet'ev A. V., Shakalo R. Yu // Strength of Materials. - 2019. - Vol. 51. - No.6. - P.C. 817-827. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00133-6>.
 14. Shakalo R. Yu., Pridorozhnyi R. P., Yakushev Yu. V., Merkulov V. M., Zinkovskij A. P. Dempfirovanie kolebanij ohlazhdaemyh poparno bandazhirovan-nyh rabochih lopatok turbin / Shakalo R. Yu., Pridorozhnyi R. P., Yakushev Yu. V., Merkulov V. M., Zinkovskij A. P //Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2019. № 7 (159). S. 109–113 <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.7.15>.
 15. Pridorozhnyi R. P. Modelirovanie kontaktного vzaimodejstviya i raschet napryazhenij v zone kontakta bandazhnyh polok i zamkovogo soedineniya lopatki turbiny / R. P. Pridorozhnyi, A. V. Sheremetev, Yu. V. Yakushev // Vestnik dvigatelestroeniya. - 2004. - №4. - P. 72-76.

Надійшла (received) 29.12.2023

Відомості про авторів/ About the Authors

Шакало Руслан Юрійович (Shakalo Ruslan) – Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», аспірант кафедри «Математичне моделювання та інтелектуальні обчислення в інженерії»; м. Харків, Україна; ДП «Івченко-Прогрес», керівник групи відділу компресорів; м. Запоріжжя, Україна; тел.: (099) 775-44-01; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4324-9191>; e-mail: shakaloryu@ivchenko-progress.com.

Ларін Олексій Олександрович (Larin Oleksiy) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», директор ННІФІ, професор кафедри «Математичне моделювання та інтелектуальні обчислення в інженерії»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5721-4400>; e-mail: oleksiy.larin@khpi.edu.ua

Савченко Кирило Валентинович (Savchenko Kyrylo) – кандидат технічних наук, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України, старший науковий співробітник; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9690-9758>; e-mail: savchenko@ipp.kiev.ua