

*Л. В. КОЛОДЯЖНА, Ю. А. БИКОВ***АЕРОПРУЖНА ПОВЕДІНКА ДОВГИХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ОСТАННЬОГО СТУПЕНЯ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ 220 МВт**

Представлено результати числового аналізу аеропружних характеристик лопаткового вінця ротора останнього ступеня парової турбіни 220 МВт з довжиною лопаток 1200 мм. При аналізі використовувався метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток, який дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр нестационарних навантажень і коливань лопаток в потоці в'язкого газу. Результати розрахунків показали відсутність флатеру та автоколивань на перших п'яти власних формах коливань лопатки у номінальному режимі роботи парової турбіни.

**Ключові слова:** флатер, парова турбіна, модальний метод, числова аеродинаміка, номінальний режим

*L. KOLODYAZHNAYA, Y. BYKOV***AEROELASTIC BEHAVIOR OF LONG BLADES OF LAST STAGE OF A 220 MW STEAM TURBINE**

The phenomenon of flutter in steam turbines is quite rare, but when it occurs, the risk of damaging the blades and putting the whole unit out of service increases significantly. Currently, there is a tendency to increase the length of the blades of the last stages of powerful steam turbines, as a result of which the amplitude-frequency characteristics of the blade oscillations change, which can lead to the occurrence of uncontrolled self-excited oscillations. The paper presents the results of a numerical analysis of the aeroelastic characteristics of blade row of the last stage rotor of a 200 MW steam turbine, in which, during modernization, the length of the blades increased to 1200 mm, which made it necessary to check the resistance to flutter in operating modes. The analysis used the method of solving the coupled problem of unsteady aerodynamics and elastic blade vibrations, which allows to predict the amplitude-frequency spectrum of unsteady loads and blade vibrations in a viscous gas flow. The results of the calculations showed the absence of flutter and self-oscillations on the first five natural forms of blade oscillations in the nominal mode of operation of the steam turbine.

**Key words:** flutter, steam turbine, modal method, CFD, design mode

**Вступ**

Однією з найбільш гострих та важливих проблем, що впливають на надійність проточних частин турбомашин, є аеропружність лопаткових апаратів. Проблема вивчення аеропружності виникає в різноманітних лопаткових машинах, зокрема, в парових турбінах [1]–[4], вітрових турбінах [5], вентиляторах [6]–[10], компресорах [11]–[14], і т. п. Підходи до моделювання аеропружних явищ у турбомашині схожі та полягають у моделюванні взаємодії двох фізичних середовищ (рідкої та пружної). Найбільш швидкими методами моделювання є розв'язання проблеми у частотній області [15]–[17]. Ці підходи ігнорують вплив лопаток, що коливаються, на основний потік газу. У рамках окремо розглянутих задач випадає з розгляду одне з найскладніших і найменш вивчених явищ – коливання, що самозбуджуються (флатер). Для отримання повної картини взаємодії рідини та структури необхідно пряме розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса та руху лопатки [18]–[20].

На підставі аналізу сучасного стану проблеми аеропружності турбомашин і існуючих методів прогнозування флатера можна зробити висновок, що найбільш перспективним підходом у дослідженні аеропружної поведінки лопаткового вінця (ступеня) турбомашини є підхід, заснований на тривимірній моделі нестационарної аеродинаміки і модальному аналізі руху лопатки (зв'язана аеропружна задача) [21]–[22]. Даний метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки і

пружних коливань лопаток дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток в тривимірному потоці газу, включаючи вимушені коливання, самозбудні коливання з метою підвищення надійності лопаткових апаратів турбомашин.

У роботі використано математичну модель течії в'язкого газу у вигляді системи нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених по Рейнольдсу, записано початкові та граничні умови для розв'язання задачі, обрано модель турбулентності Болдвіна-Ломакса. Для опису коливань лопаток в тривимірному потоці в'язкого газу використовується модальний підхід.

**Мета роботи**

Основна мета роботи – підвищення надійності робочого колеса парової турбіни на стадії проектування шляхом прогнозування нестационарних аеропружних характеристик на підставі розв'язання зв'язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань лопаток в тривимірному потоці в'язкого газу.

**Постановка аеропружної задачі**

З використанням розробленого числового методу було проведено аналіз аеропружної поведінки лопаткового вінця останнього ступеня турбомашини 220 МВт. Лопатки ротора були вдосконалені за допомогою новітнього метода [23], в результаті

чого довжина лопатки збільшилась до 1200 мм.

На підставі запропонованого числового методу [24] послідовного на кожній ітерації інтегрування рівнянь течії в'язкого газу (осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса) і рівнянь коливань лопаток під дією миттєвих нестационарних навантажень, (з використанням модального підходу) проведено числовий аналіз аеропружної поведінки лопаткового вінця останнього ступеня турбомашини на номінальному режимі.

На рис. 1 представлено фрагменти різницевої сітки в меридіональній площині (рис. 1а), в тангенціальній площині (кореневий переріз лопаткового вінця, рис. 1б) і тангенціальні проекції вихідних перерізів, що формують лопатку вінця (рис. 1в). Кожен із сегментів розрахункової області дискретизується з використанням гібридної деформованої  $H-O$  сітки. Щільність різницевої сітки для кожного з міжлопаткових каналів становить:  $H$ -сітка містить 66800 комірок, деформуєма  $O$ -сітка  $48 \times 26 \times 200 = 249600$ .

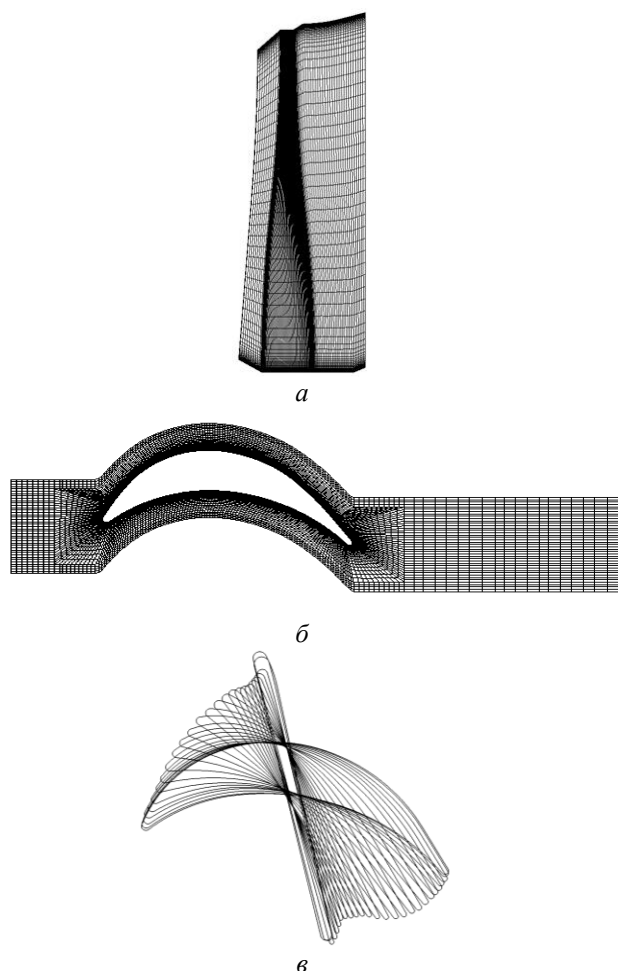


Рис. 1 – Фрагмент різницевої сітки:  
а – меридіональний переріз різницевої сітки;  
б – тангенціальний переріз різницевої сітки;  
в – тангенціальні проекції робочої лопатки

Числове дослідження проведено для лопаткового вінця останнього ступеня парової турбіни потужністю 220 МВт з довжиною робочої лопатки  $L = 1200$  мм при різних значеннях міжлопаткового фазового кута (МЛФК).

Розглядався номінальний режим роботи лопаткового вінця останнього ступеня з постійним по колу протитиском.

Розрахунки виконано для номінального режиму з параметрами:

– змінний по радіусу тиск і температура загальмованого потоку перед вінцем  $P_0 = 12578\text{--}13590$  Па;  $T_0 = 323\text{--}325$  °К;

– кути потоку в коловому ( $\alpha$ ) і радіальному ( $\gamma$ ) напрямках задано;

– змінний по радіусу статичний тиск за вінцем  $P_2 = 3194\text{--}3169$  Па;

– частота обертів ротора  $n = 3000$  об/хв.

Колівання робочих лопаток визначалися з урахуванням перших п'яти власних форм коливань. Значення власних частот і форм демпфування наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Власні частоти і форми

Номер форми	1	2	3	4	5
$\nu_i$ , Гц	83,76	118,67	199,76	228,80	289,72

На першому етапі виконано аеродинамічні розрахунки лопаткового вінця турбіни при заданому законі коливань лопаток. Всі 63 лопатки здійснюють гармонійні коливання по кожній з власних форм по одному і тому ж закону з постійним кутом зрушення фаз  $\delta$  (МЛФК =  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$  з врахуванням взаємодії п'яти власних форм):

$$q_{ij} = q_{i0} \sin[2\pi\nu_i t + (j-1)\delta],$$

де  $q_{ij}$  – модальний коефіцієнт;

$i$  – номер власної форми;

$j$  – номер лопатки;

$q_{i0}$  – амплітуда коливань  $i$ -ої власної форми;

$\nu_i$  – власна частота;

$\delta$  – міжлопатковий кут зрушення по фазі коливань сусідніх лопаток.

### Числовий аналіз

Аеропружна стійкість системи «потік пари – лопатковий вінець» без врахування механічного демпфування визначається аеродинамічним коефіцієнтом демпфування  $D$ , рівним узятому із знаком «мінус» коефіцієнту роботи  $W$ , здійснюваним аеродинамічним навантаженням за один період коливань. Знак «мінус» сумарної роботи ( $D > 0$ ) відповідає аеродемпфуванню, знак «плюс» – самозбудженню лопатки ( $D < 0$ ).

Характер обміну енергією між потоком пари і лопатками, що коливаються, показано на рис. 2

(вплив міжлопаткового кута зсуву за фазою коливань лопаток на усереднений по довжині коефіцієнт аеродемпфування).

На рис. 2а наведено графіки зміни коефіцієнта аеродемпфування по висоті лопатки для різних кутів зсуву за фазою коливань сусідніх лопаток МЛФУ = 0°, 180°, ±90°. Як видно з графіка гармонічні коливання за висотою лопатки характеризуються відведенням енергії від лопатки в потік. На рис. 2б показано вплив міжлопаткового кута зсуву

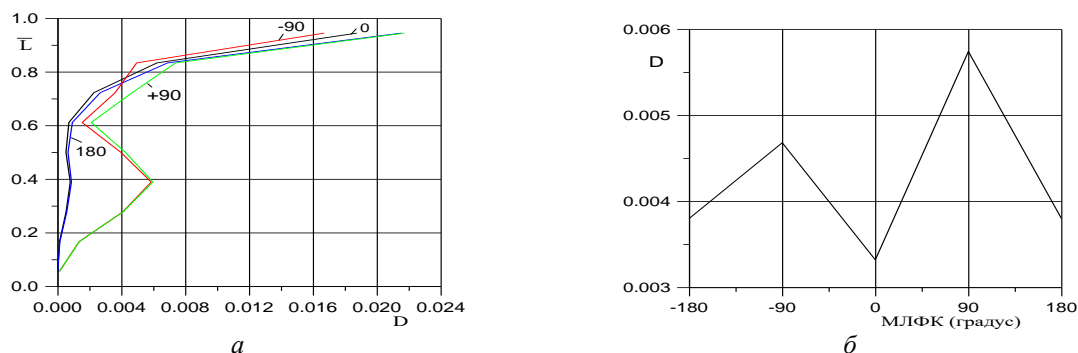


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта аеродемпфування від кута зсуву фаз коливань лопаток (МЛФК): а – зміна коефіцієнта аеродемпфування по висоті лопатки (1–5 власна форма коливань); б – залежність усередненого по висоті лопатки коефіцієнта аеродемпфування від МЛФК (1–5 власна форма коливань)

Остаточну оцінку аеропружної поведінки лопаткового вінця можна отримати при розв'язанні зв'язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань. В цьому випадку реакція лопаток залежить не лише від гармонійних коливань, але і від аеродинамічної взаємодії і обміну енергією між нестационарним потоком і лопатками, що коливаються.

Другий етап розрахунку – проведення аеродинамічних розрахунків лопаткового вінця турбіни, що обертається, в паровому потоці при зв'язаних коливаннях.

На рис. 3а–м, приведено графіки зміни в часі модальних коефіцієнтів 1-ої – 5-ої власних форм ( $i$  – номер форми) для МЛФК = 0° і їх амплітудно-частотні характеристики (зв'язані коливання протягом 4-х періодів  $t = 0,0-0,25136$  с).

На графіках рис. 3 видно, що зв'язані коливання лопаткового вінця характеризуються демпфуванням коливань для кожної із власних форм. Переважаючими частотами для всіх форм коливань є частоти, близькі до власних.

Колівання лопаток приводять до появи нестационарних аеродинамічних навантажень, які діють на лопатки. Починаючи з моменту часу  $t = 0,12568$  с (стартовий режим зв'язаних коливань) подальший рух лопаток визначається нестационарними силами, що діють на лопатки, які, у свою чергу, залежать від коливань лопаток, тобто рух

за фазою коливань лопаток на середній по довжині коефіцієнт аеродемпфування. Як видно з графіків, коефіцієнт аеродемпфування  $D > 0$  ( $W < 0$ ) для всіх значень МЛФК, що відповідає відведенню енергії від лопатки (аеродемпфування коливань). Максимальні значення коефіцієнта аеродемпфування відповідають МЛФК = -90°, +90°, мінімальні значення (найбільше збудження) відповідають МЛФК = 0°, 180°.

лопаток і сили, діючі на них, знаходяться з розв'язання зв'язаної задачі.

На рис. 4–6 приведено графіки нестационарних аеродинамічних навантажень (колова, осьова сила і аеродинамічний момент), що діють у середньому, кореновому та периферійному шарі, а також їх амплітудно-частотні спектри (МЛФК = 0°, відповідного найбільшому збудженню).

Представлені графіки залежності навантажень за часом демонструють підвищені значення у період вимушених коливань та зниження амплітуд під час зв'язаних коливань, коли амплітуда вібрацій лопатки знижується. Частоти навантажень близькі до власних частот та відповідають частотам коливань лопаток.

На рис. 7 приведено графіки коливань периферійного перетину лопатки в коловому напрямку, осьовому і повороту відносно центру тяжіння для МЛФК = 0° з врахуванням взаємодії п'яти власних форм коливань.

Найбільший вклад в нестационарні складові коливань в коловому напрямку вносить частота близька до частоти 1-ої (84 Гц), в осьовому напрямку – частота близька до частоти 2-ої власної форми (119 Гц), в крутильні коливання – частоти, близькі до частот 2-ої та 3-ої власних форм (199 та 219 Гц). Переміщення лопатки по всім напрямкам демпфуються під час вільних коливань.

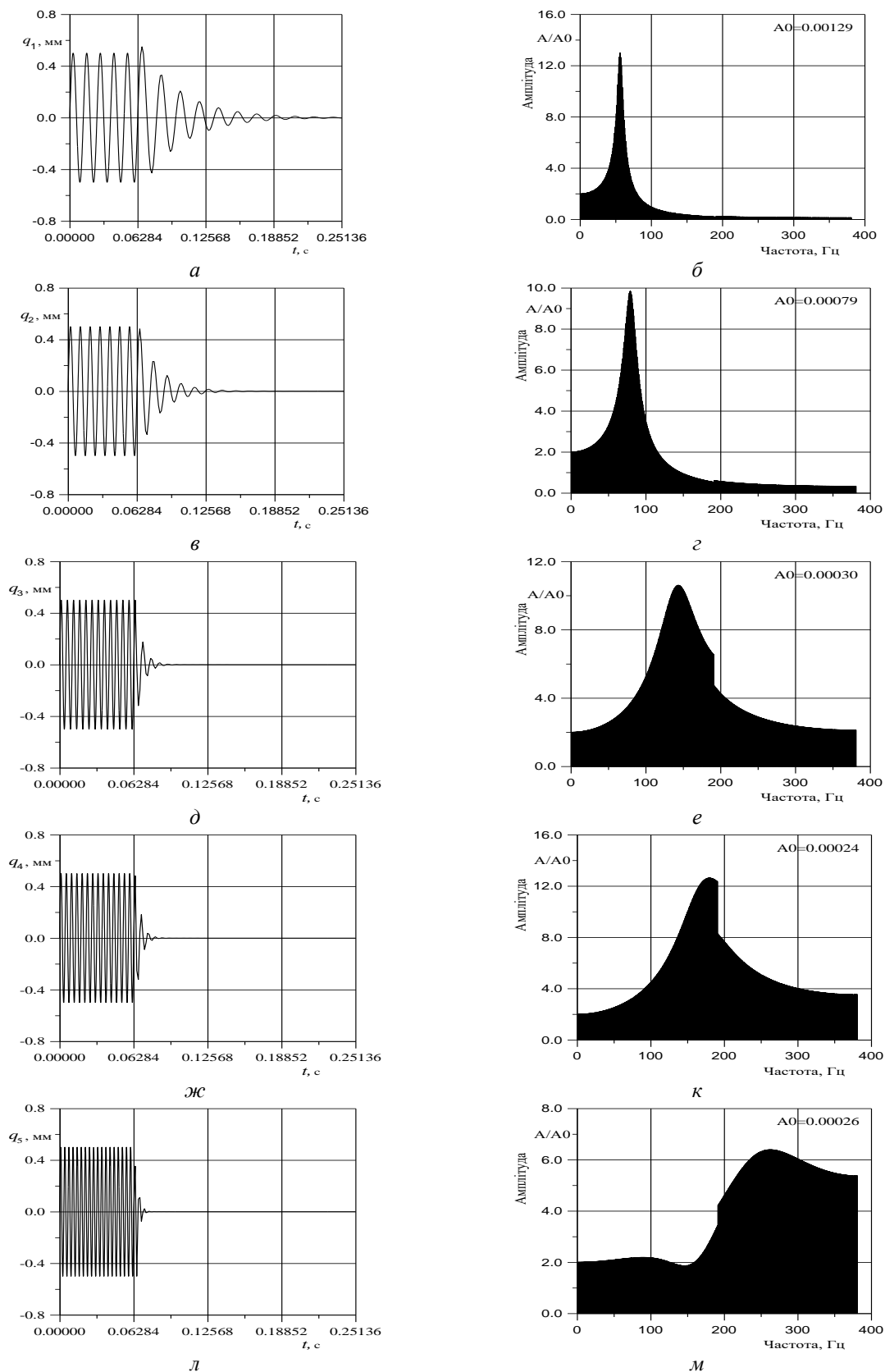


Рис. 3 – Зміна модальних коефіцієнтів (МЛФК = 0°):  
 $a, б$  – 1-а форма;  $в, з$  – 2-а форма;  $д, е$  – 3-а форма;  $жс, к$  – 4-а форма;  $л, м$  – 5-а форма

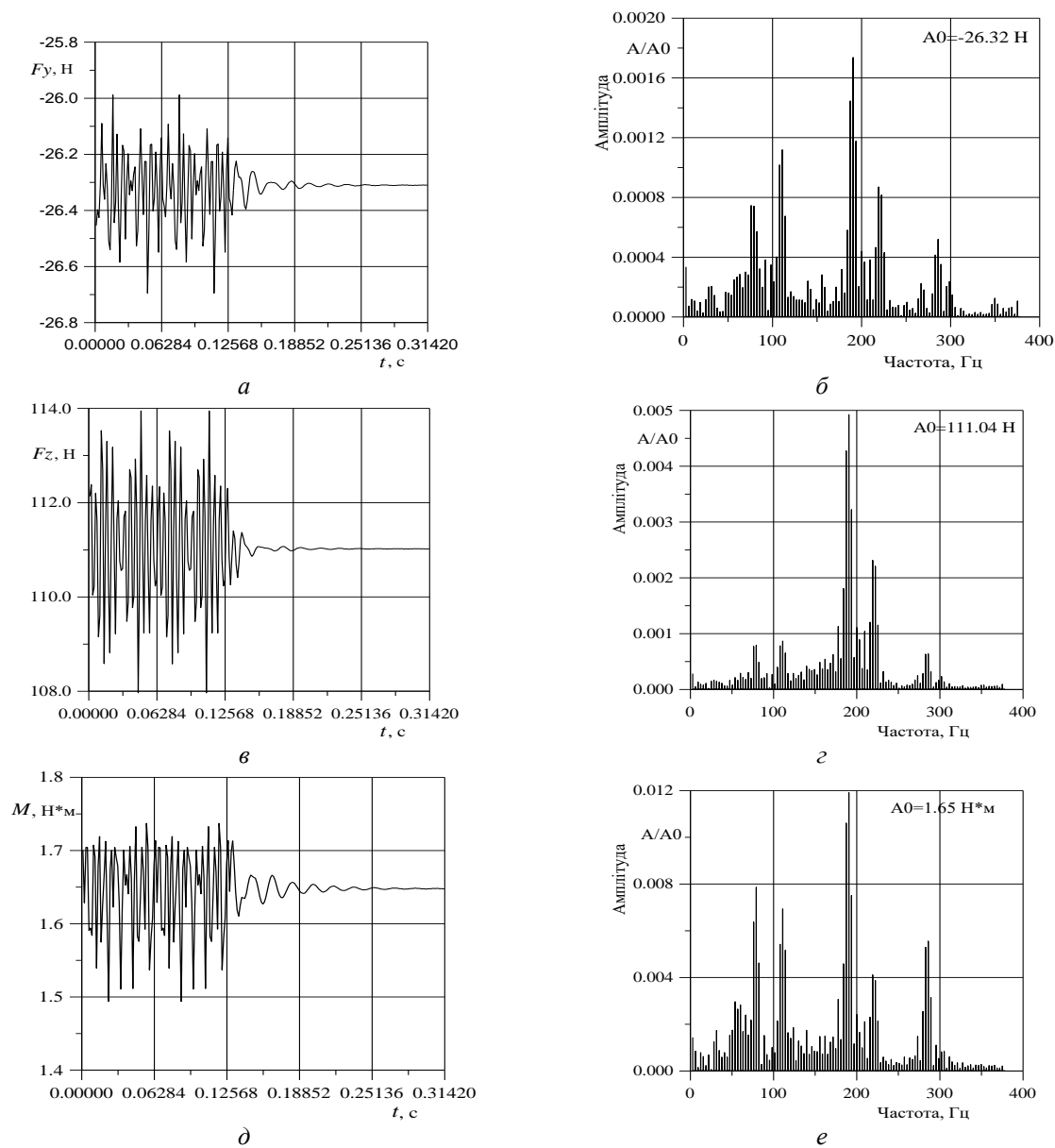
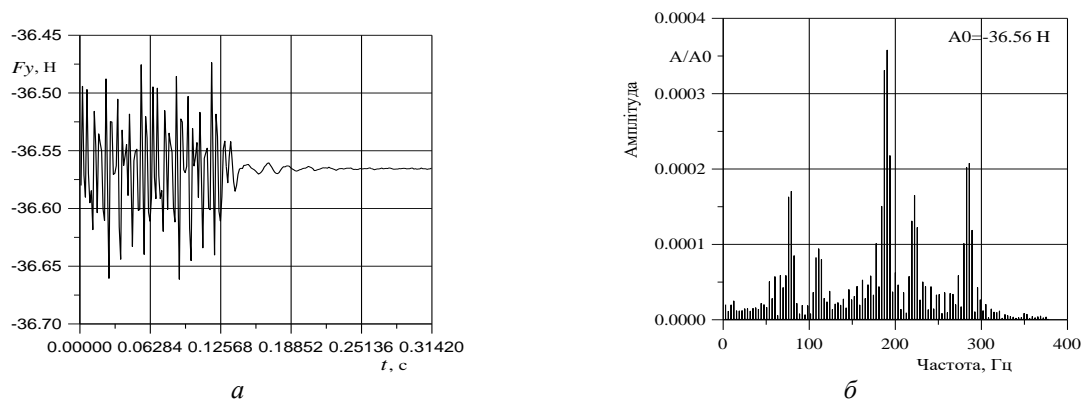


Рис. 4 – Зміна нестационарних сил в периферійному шарі робочої лопатки:  
*a, б* – окружна сила і амплітудно-частотна характеристика; *в, г* – осьова сила і амплітудно-частотна характеристика; *д, е* – аеродинамічний момент і амплітудно-частотна характеристика



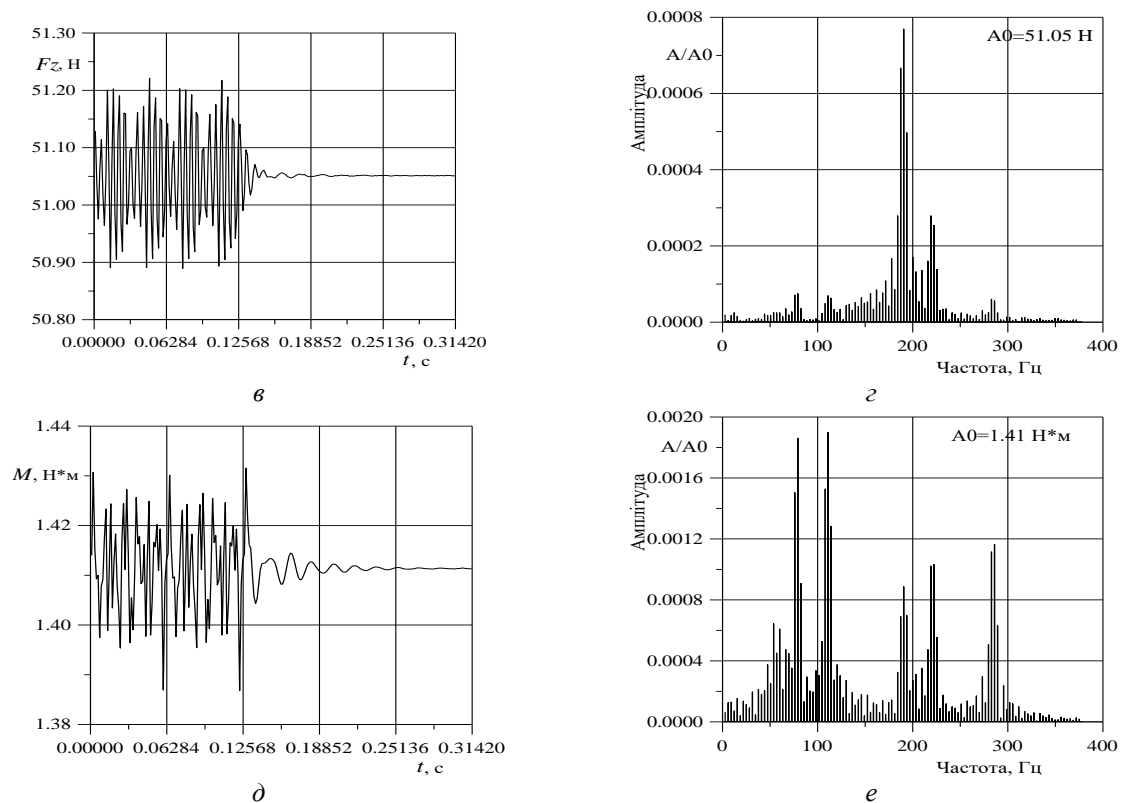
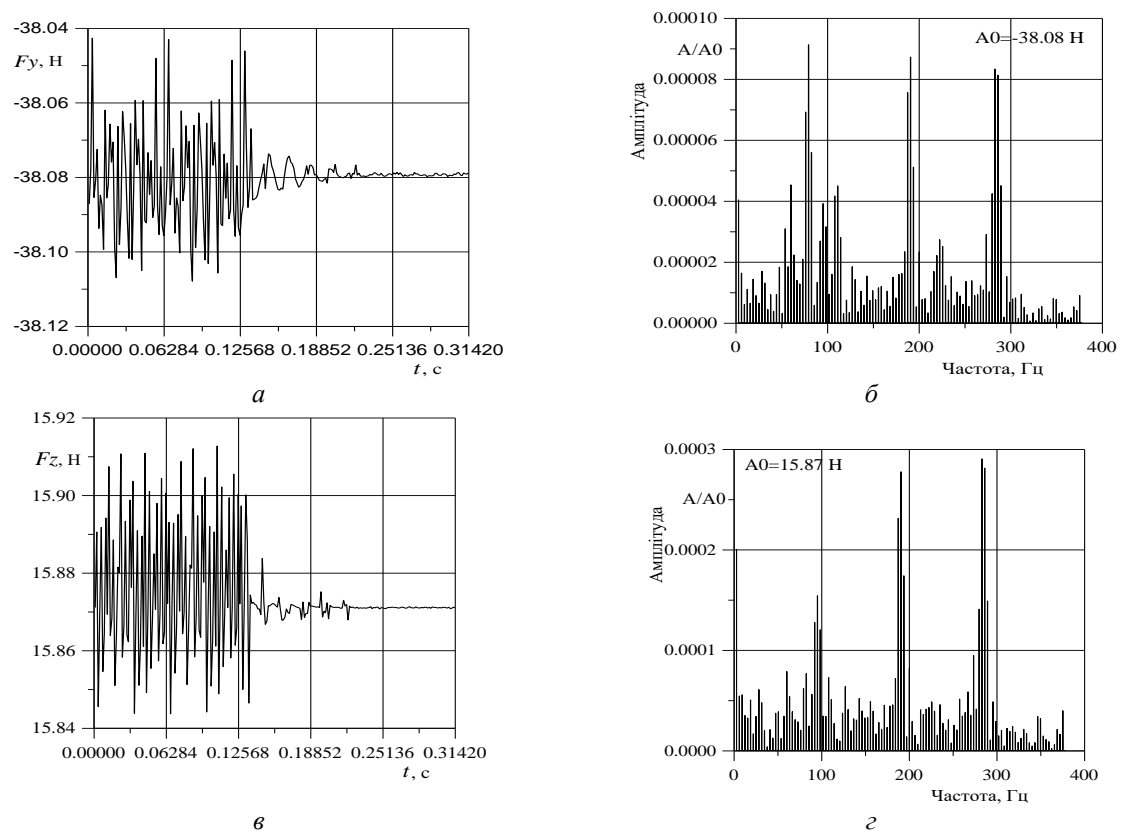


Рис. 5 – Зміна нестационарних сил в середньому шарі робочої лопатки:  
 а, б – окружна сила і амплітудно-частотна характеристика; в, г – осьова сила і амплітудно-частотна характеристика; д, е – аеродинамічний момент і амплітудно-частотна характеристика



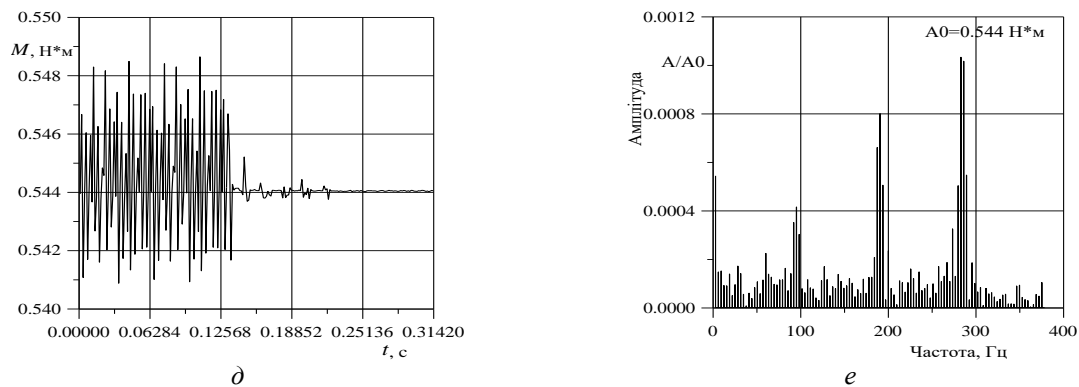


Рис. 6 – Зміна нестационарних сил в кореновому шарі робочої лопатки:  
*a, б* – окружна сила і амплітудно-частотна характеристика; *в, г* – осьова сила і амплітудно-частотна характеристика; *д, е* – аеродинамічний момент і амплітудно-частотна характеристика

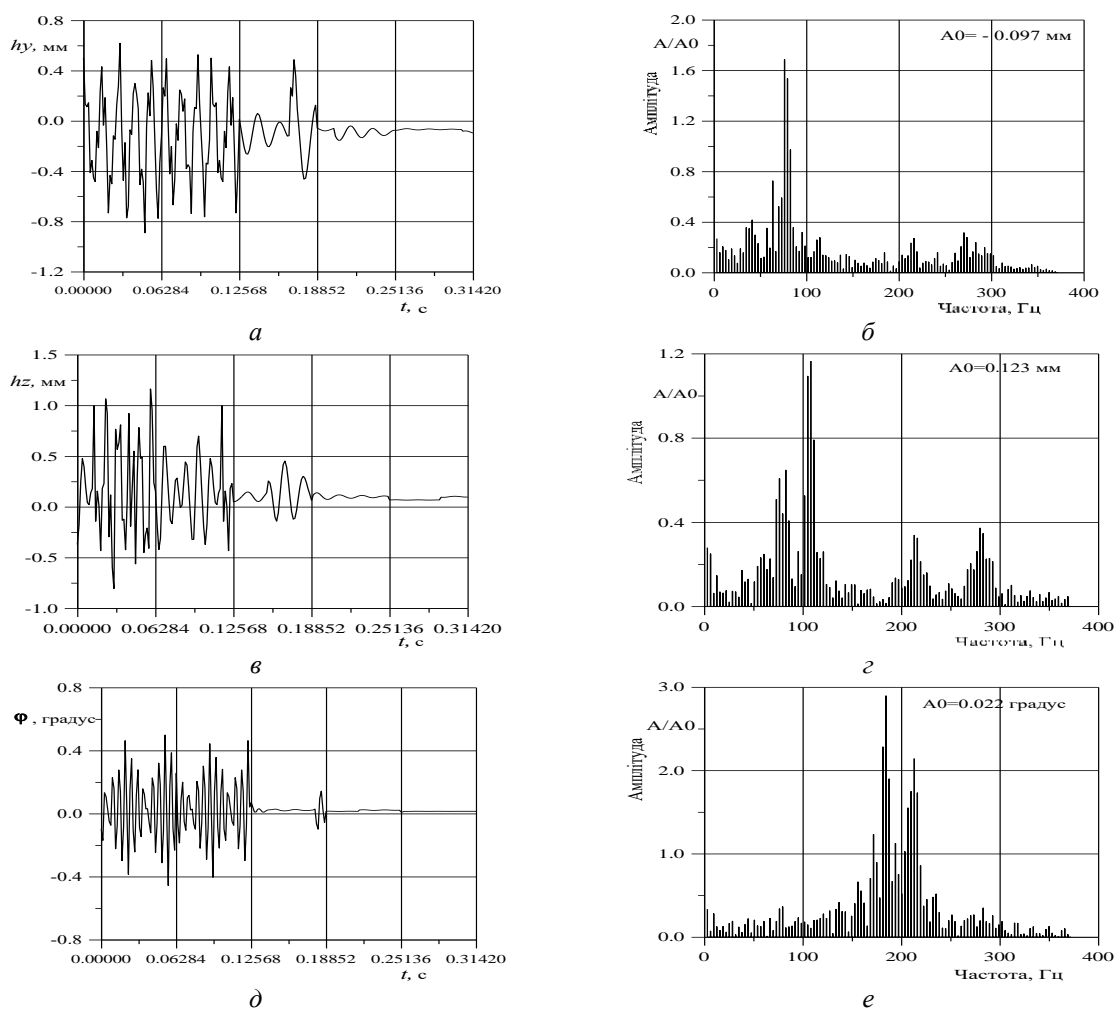


Рис. 7 – Переміщення периферійного перетину лопаткового вінця (МЛФК = 0°):  
*a* – в коловому напрямку; *б* – амплітудно-частотний спектр; *в* – в осьовому напрямку; *г* – амплітудно-частотний спектр; *д* – кут повороту відносно центру тяжіння; *е* – амплітудно-частотний спектр

### Висновки

Проведено числовий аналіз аеропружних характеристик лопаткового вінця ротора останнього ступеня парової турбіни 220 МВт з довжиною лопаток 1200 мм. Необхідність аналізу виникла після модернізації робочих лопаток ступеня, внаслідок якої довжина лопаток збільшилась до 1200 мм. При аналізі використовувався метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та

паток 1200 мм. Необхідність аналізу виникла після модернізації робочих лопаток ступеня, внаслідок якої довжина лопаток збільшилась до 1200 мм. При аналізі використовувався метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та

пружних коливань лопаток, який дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр нестационарних навантажень і коливань лопаток в потоці в'язкого газу. Числові моделювання виконувались для вимушених та вільних коливань лопаток, що обтікаються в'язкою парою. Результати розрахунків підтвердили стійкий режим роботи лопаток робочого колеса останнього ступеня турбіни на номінальному режимі.

#### Список літератури

- Rzadkowski R. Unsteady Forces in LP Last Stage 380 MW Steam Turbine Rotating and Non-vibrating Rotor Blades with Exhaust Hood / R. Rzadkowski, J. Surwilo, L. Kubitz, M. Szymaniak // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 5. – pp. 357–368. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0055-y>.
- Petrie-Repar P. Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case / P. Petrie-Repar, C. Fuhrer, M. Grübel, D. Vogt // ISUAAAT2014, The 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 8th–11th September 2015, Stockholm, Sweden. – N.Y. : Curran Associates, Inc., 2015. – pp. 33–43.
- Drewczyński M. Free vibration of a mistuned steam turbine last stage Bladed Disc / M. Drewczyński, R. Rzadkowski, A. Maurin, P. Marszałek // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2015*, June 15–19, Montreal, Canada. – GT 2015-26011. – N.Y. ASME., 2015. – 10 p. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2015-42080>.
- Sun T. Detached-Eddy Simulation Applied to Aeroelastic Stability Analysis in a Last-Stage Steam Turbine Blade / T. Sun, P. Petrie-Repar, D. M. Vogt, A. Hou // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(9). – pp. 091002-1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043407>.
- Sabale A. K. Nonlinear Aeroelastic Analysis of Large Wind Turbines Under Turbulent Wind Conditions / A. K. Sabale, N. K. V. Gopal // *AIAA Journal*. – 2019. – No. 57(10). – pp. 4416–4432. – DOI: <https://doi.org/10.2514/1.J057404>.
- Vahdati M. Mechanisms for wide-chord fan blade flutter / M. Vahdati, G. Simpson, M. Imregun // *Journal of Turbomachinery*. – 2011. – Vol. 133. – pp. 041029-1–7. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/GT2009-60098>.
- Romera D. Nonlinear Stability Analysis of a Generic Fan with Distorted Inflow Using Passage-Spectral Method / D. Romera, R. Corral // *ASME. J. Turbomach.* – 2021. – No. 143(6). – pp. 061001-1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4050144>.
- Stapelfeldt S. Improving the Flutter Margin of an Unstable Fan Blade / S. Stapelfeldt, M. Vahdati // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(7). – pp. 071006-1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4042645>.
- Dong X. Effect of Tip Clearance on the Aeroelastic Stability of a Wide-Chord Fan Rotor / X. Dong, Y. Zhang, Z. Zhang, X. Lu // *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.* – 2020. – No. 142(9). – pp. 091010-1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048020>.
- Vahdati M. Aeroelastic Instability in Transonic Fans / M. Vahdati, N. Cumpsty // *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.* – 2018. – No. 138(2). – pp. 022604-1–14. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4031225>.
- Hanschke B. Consequences of Borescope Blending Repairs on Modern High-Pressure Compressor Blisk Aeroelasticity / B. Hanschke, A. Kühhorn, S. Schrape, T. Giersch // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(2). – pp. 021002-1–7. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041672>.
- Besem F. M. Influence of the Tip Clearance on a Compressor Blade Aerodynamic Damping / F. M. Besem, R. E. Kielb // *Journal of Propulsion and Power.* – 2017. – No. 33(1). – pp. 227–233. – DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B36121>.
- Gan J. Stall Flutter Simulation of a Transonic Axial Compressor Stage Using a Fully Coupled Fluid-Structure Interaction / J. Gan, H. Im, G. Zha // *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. – 2017. – AIAA 2017-0783. – pp. 1–28. – DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-0783>.
- Vallon A. Numerical investigations of flutter phenomenon in compressor stages of helicopter engines / A. Vallon, M. Herran, V. Ficat-Andrieu, Y. Detandt // *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. – 2018. – AIAA 2018-4091. – pp. 1–9. – DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-4091>.
- Corral R. Tip-Shroud Labyrinth Seal Effect on the Flutter Stability of Turbine Rotor Blades / R. Corral, M. Greco, A. Vega // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(10). – pp. 101006-1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043962>.
- Huang H. An Efficient Aeroelastic Eigenvalue Method for Analyzing Coupled-Mode Flutter in Turbomachinery / H. Huang, W. Liu, P. Petrie-Repar, D. Wang // *ASME. J. Turbomach.* – 2021. – No. 143(2). – pp. 021010-1–12. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048294>.
- Ojha V. Adaptive High-Order Fluid-Structure Interaction Simulations with Reduced Mesh-Motion Errors / V. Ojha, K. J. Fidkowski, C. E. S. Cesnik // *AIAA Journal*. – 2021. – No. 59(6). – pp. 2084–2101. – DOI: <https://doi.org/10.2514/1.J059730>.
- Rzadkowski R. Unsteady Rotor Blade Forces of 3D Transonic Flow Through Steam Turbine Last Stage and Exhaust Hood with Vibrating Blades. Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya, R. Szczepanik // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2019. – pp. 523–531. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_52).
- Rzadkowski R. Aeroelasticity analysis of unsteady rotor blade forces and displacements in LP last stage steam turbine with various pressure distributions the stage exit / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 5. – pp. 333–337. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0049-9>.
- Rzadkowski R. Aeroelastic Behaviour of a 3.5 Stage Aircraft Compressor Rotor Blades Following a Bird Strike / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya, L. Kubitz // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 4. – pp. 281–287. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0044-1>.
- Rzadkowski R. Flutter of long blades in a steam turbine / R. Rzadkowski, L. Kubitz, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 4. – pp. 289–296. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0040-5>.
- Донченко В. В. Прогнозування флатера лопаткового вінця вентилятора авіаційного двигуна / В. В. Донченко, В. І. Гнесін, Л. В. Колодяжна, І. Ф. Кравченко, О. В. Петров // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 2(4). – 11–17 с. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – <https://doi.org/10.20998/2078-774X-2020.02.02>.
- Rusanov A. The Efficiency Increase of the Steam Turbine Low Pressure Cylinder Last Stage by the Blades Spatial Profiling / A. Rusanov, V. Shvetsov, S. Alyokhina, N. Pashchenko, R. Rusanov, M. Ishchenko, L. Slaston, R. Sherfedinov // *J. of Mech. Eng.* – 2020. – Vol. 23(1). – pp. 6–14. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.006>.
- Gnesin V. I. Aeroelastic behaviour of turbine blade row in 3D viscous flow / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya, R. Rzadkowski // *J. of Mech. Eng.* – 2018. – Vol. 21(1). – pp. 19–30. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2018.01.019>.

#### References (transliterated)

- Rzadkowski R., Surwilo J., Kubitz L. and Szymaniak M. (2018), “Unsteady Forces in LP Last Stage 380 MW Steam Turbine Rotating and Non-vibrating Rotor Blades with Exhaust Hood”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*,



- Vol. 6, Iss. 5, pp. 357–368, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0055-y>.
2. Petrie-Repar P., Fuhrer C., Grübel M. and Vogt D. (2015), “Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case”, *ISUAAAT2014, The 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 8th–11th September 2015, Stockholm, Sweden*, N.Y.: Curran Associates, Inc., pp. 33–43.
  3. Drewczyński M., Rzadkowski R., Maurin A. and Marszałek P. (2015), “Free vibration of a mistuned steam turbine last stage Bladed Disc”, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2015, June 15–19, Montreal, Canada, GT 2015-26011*, N.Y.: ASME, 10 p.
  4. Sun T., Petrie-Repar P., Vogt D. M. and Hou A. (2019), “Detached-Eddy Simulation Applied to Aeroelastic Stability Analysis in a Last-Stage Steam Turbine Blade”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(9), pp. 091002-1–11, <https://doi.org/10.1115/GT2015-42080>.
  5. Sabale A. K. and Gopal N. K. V. (2019), “Nonlinear Aeroelastic Analysis of Large Wind Turbines Under Turbulent Wind Conditions”, *AIAA Journal*, No. 57(10), pp. 4416–4432, <https://doi.org/10.2514/1.J057404>.
  6. Vahdati M., Simpson G. and Imregun M. (2011), “Mechanisms for wide-chord fan blade flutter”, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, pp. 041029-1–7, <http://dx.doi.org/10.1115/GT2009-60098>.
  7. Romera D. and Corral R. (2021), “Nonlinear Stability Analysis of a Generic Fan with Distorted Inflow Using Passage-Spectral Method”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 143(6), pp. 061001-1–9, <https://doi.org/10.1115/1.4050144>.
  8. Stapelfeldt S. and Vahdati M. (2019), “Improving the Flutter Margin of an Unstable Fan Blade”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(7), pp. 071006-1–9, <https://doi.org/10.1115/1.4042645>.
  9. Dong X., Zhang Y., Zhang Z. and Lu X. (2020), “Effect of Tip Clearance on the Aeroelastic Stability of a Wide-Chord Fan Rotor”, *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.*, No. 142(9), pp. 091010-1–11, <https://doi.org/10.1115/1.4048020>.
  10. Vahdati M. and Cumpsty N. (2018), “Aeroelastic Instability in Transonic Fans”, *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.*, No. 138(2), pp. 022604-1–14, <https://doi.org/10.1115/1.4031225>.
  11. Hanschke B., Kühhorn A., Schrape S. and Giersch T. (2019), “Consequences of Borescope Blending Repairs on Modern High-Pressure Compressor Blisk Aeroelasticity”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(2), pp. 021002-1–7, <https://doi.org/10.1115/1.4041672>.
  12. Besem F. M. and Kielb R. E. (2017), “Influence of the Tip Clearance on a Compressor Blade Aerodynamic Damping”, *Journal of Propulsion and Power*, No. 33(1), pp. 227–233, <https://doi.org/10.2514/1.B36121>.
  13. Gan J., Im H. and Zha G. (2017), “Stall Flutter Simulation of a Transonic Axial Compressor Stage Using a Fully Coupled Fluid-Structure Interaction”, *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, AIAA 2017-0783, pp. 1–28, <https://doi.org/10.2514/6.2017-0783>.
  14. Vallon A., Herran M., Ficat-Andrieu V. and Detandt Y. (2018), “Numerical investigations of flutter phenomenon in compressor stages of helicopter engines”, *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2018-4091, pp. 1–9, <https://doi.org/10.2514/6.2018-4091>.
  15. Corral R., Greco M. and Vega A. (2019), “Tip-Shroud Labyrinth Seal Effect on the Flutter Stability of Turbine Rotor Blades”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(10), pp. 101006-1–10, <https://doi.org/10.1115/1.4043962>.
  16. Huang H., Liu W., Petrie-Repar P. and Wang D. (2021), “An Efficient Aeroelastic Eigenvalue Method for Analyzing Coupled-Mode Flutter in Turbomachinery”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 143(2), pp. 021010-1–12, <https://doi.org/10.1115/1.4048294>.
  17. Ojha V., Fidkowski K. J. and Cesnik C. E. S. (2021), “Adaptive High-Order Fluid-Structure Interaction Simulations with Reduced Mesh-Motion Errors”, *AIAA Journal*, No. 59(6), pp. 2084–2101, <https://doi.org/10.2514/1.J059730>.
  18. Rzadkowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. and Szczepanik R. (2019), “Unsteady Rotor Blade Forces of 3D Transonic Flow Through Steam Turbine Last Stage and Exhaust Hood with Vibrating Blades”, *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, pp. 523–531, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_52).
  19. Rzadkowski R., Gnesin V. and Kolodyazhnaya L. (2018), “Aeroelasticity analysis of unsteady rotor blade forces and displacements in LP last stage steam turbine with various pressure distributions the stage exit”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 5, pp. 333-337, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0049-9>.
  20. Rzadkowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. and Kubitz L. (2018), “Aeroelastic Behaviour of a 3.5 Stage Aircraft Compressor Rotor Blades Following a Bird Strike”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 281–287, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0044-1>.
  21. Rzadkowski R., Kubitz L., Gnesin V. and Kolodyazhnaya L. (2018), “Flutter of long blades in a steam turbine”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 289–296, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0040-5>.
  22. Donchenko V., Gnesin V., Kolodyazhnaya L., Kravchenko I. and Petrov A. (2020), “Predicting the Flutter of the Fan Row in the Aircraft Engine”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 2(4), pp. 11–17, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.02>.
  23. Rusanov A., Shvetsov V., Alyokhina S., Pashchenko N., Rusanov R., Ishchenko M., Slaston L. and Sherfedinov R. (2020), “The Efficiency Increase of the Steam Turbine Low Pressure Cylinder Last Stage by the Blades Spatial Profiling”, *J. of Mech. Eng.*, vol. 23(1), pp. 6–14, <https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.006>.
  24. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. and Rzadkowski R. (2018), “Aeroelastic behaviour of turbine blade row in 3D viscous flow”, *J. of Mech. Eng.*, vol. 21(1), pp. 19–30, <https://doi.org/10.15407/pmach2018.01.019>.

Надійшла (received) 18.11.2022

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Колодяжна Любов Володимирівна (Kolodyazhnaya Lyubov)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, провідний науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, м. Харків, Україна; тел.: (057) 349–47–27; e-mail: gnesin@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5469-4325>.

**Буков Юрій Адольфович (Bykov Yuriy)** – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, старший науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, м. Харків, Україна; тел.: (057) 349–47–76; e-mail: bykow@ipmach.kharkov.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7089-8993>.