

В. И. ГНЕСИН, Л. В. КОЛОДЯЖНАЯ, Р. ЖАНДКОВСКИ

**ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ НА АЭРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ЛОПАТОЧНОГО
ВЕНЦА ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ В ТРЕХМЕРНОМ ПОТОКЕ
ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА**

АННОТАЦИЯ Проведен численный анализ аэроупругого поведения лопаточного аппарата последней ступени турбомашин при различных значениях давления в конденсаторе с учетом неравномерности потока, вызванной лопатками статора и неравномерным в окружном направлении распределением давления за рабочим колесом из-за неосесимметричного патрубка, а также нестационарных эффектов, вызванных колебаниями лопаток. Предложенный метод решения связанной задачи позволяет прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток, включая вынужденные, самовозбуждающиеся колебания и автоколебания с целью повышения экономичности и надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Ключевые слова: последняя ступень турбомашин, выхлопной патрубок, трехмерный нестационарный поток, численное моделирование.

V. GNESIN, L. KOLODYAZHNAYA, R. RZADKOWSKI

**INFLUENCE OF THE BACKPRESSURE ON THE AEROELASTIC VIBRATIONS OF THE
BLADE RING AT THE LAST STAGE OF TURBINE MACHINE IN THE 3D FLOW OF AN
IDEAL GAS**

ABSTRACT The turbomachine working process can be described as the conversion of the heat energy of actuating medium into the mechanical energy of rotary rotor, i.e. as the force interaction between the gas flow and the moving cascades. This process can be viewed as a steady-state process, due to its cyclic repetition at least each other rotor revolution. However, the main cycle is accompanied by many nonstationary phenomena that occur in aerodynamic cascades traversing the inhomogeneous field. Nonstationary flow behavior produces a considerable influence on the energy conversion in the turbine cascade, which results in the aerodynamic excitation of vibrations in the blade row. Aerodynamically excited vibrations of turbine and compressor blades can result in the structure failure and therefore the most important reliability and safety problem must be solved. This scientific paper gives the numerical simulation data for the 3D flow of an ideal gas through the last stage of the turbomachine at different pressure values in the capacitor taking into consideration the nonuniform flow caused by the stator blades, the nonuniform pressure distribution in the exhaust nozzle and nonstationary effects caused by blade vibrations. The numerical method is based on the solution of coupled aeroelastic problem for 3D flow of an ideal gas through the turbine cascade and the nonaxisymmetric exhaust nozzle, including the annular diffuser. The coupled problem was solved using a partial integral method including integral Euler equations and dynamic equations for vibrating blades (the modal approach) at each time step with the information exchange. This method of the solution of coupled aeroelastic problem allows us to predict the amplitude – frequency spectrum of blade vibrations, including forced self-excited vibrations and self-oscillations to increase the efficiency and reliability of the blade rows of turbomachines.

Key words: last stage of the turbomachine, exhaust nozzle, 3D nonstationary flow, and the numerical simulation.

Введение

Течение в турбинных (компрессорных) ступенях на расчетном и нерасчетных режимах сопровождается такими сложными явлениями, как трехмерность потока, нестационарность (как периодическая, так и непериодическая), аэроупругие колебания лопаток. Нестационарные аэродинамические силы, действующие на рабочие лопатки компрессоров и турбин, могут вызвать чрезмерные вибрации лопаток, приводящие к разрушению конструкции [1–5].

Поэтому одной из важнейших проблем в области аэромеханики турбомашин является развитие теории и численных методов исследования пространственных течений с учетом таких эффектов, как нестационарность, трехмерность и аэроупругость с целью повышения экономичности и надежности лопаточных машин.

Одним из важнейших и наименее изучен-

ных явлений является самовозбуждающиеся колебания, которые являются результатом непрерывного обмена энергией между потоком газа и колеблющимися лопатками, и могут либо затухать (аэродемпфирование), либо проявляться в устойчивой форме автоколебаний, либо в неустойчивой форме флаттера. Самовозбуждающиеся колебания принципиально не могут быть изучены в рамках отдельно рассматриваемых физических сред.

В настоящей работе представлен численный анализ аэроупругого поведения лопаточного аппарата последней ступени турбомашин при различных значениях давления в конденсаторе.

Цель работы

Целью настоящей работы является численный анализ влияния режима работы последней ступени турбомашин (давления в конденсаторе) на нестационарные нагрузки и аэроупругие коле-

© В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски, 2017

бания лопаток с учетом неравномерности потока за направляющими лопатками статора и неравномерным по окружности давлением за рабочим колесом, вызванным неосесимметричным выхлопным патрубком [6].

Постановка задачи

Численное исследование проведено для последней ступени турбины мощностью 370 МВт с учетом выхлопного патрубка для двух режимов работы.

В 1-ом режиме приняты следующие граничные условия:

- число оборотов ротора $n = 3000$ об/мин;
- полное давление в абсолютной системе координат перед направляющими лопатками статора $P_0 = 24950-26500$ Па;
- полная температура в абсолютной системе координат перед статором $T_0 = 337,9-339,2$ К;
- углы потока на входе в статор в тангенциальной (α) и меридиональной (γ) плоскостях заданы;
- статическое давление в конденсаторе $P_k = 9000$ Па.

В 2-ом режиме приняты следующие граничные условия:

- число оборотов ротора $n = 3000$ об/мин;
- полное давление в абсолютной системе координат перед направляющими лопатками статора $P_0 = 33000-33200$ Па;
- полная температура в абсолютной системе координат перед статором $T_0 = 345-347$ К;
- углы потока на входе в статор в тангенциальной (α) и меридиональной (γ) плоскостях заданы;
- статическое давление в конденсаторе $P_k = 15000$ Па.

При расчете колебаний лопаток ротора учитывались первые шесть собственных форм колебаний. Собственные формы и частоты колебаний лопаток для двух режимов приняты одинаковыми. Собственные частоты для каждой из собственных форм приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Собственные частоты

Номер формы	1	2	3	4	5	6
Частота ν , Гц	120	160	240	360	480	520

Трехмерный нестационарный трансзвуковой поток идеального газа через последнюю ступень турбомшины рассматривается в физической области, включающей направляющий аппарат статора, рабочее колесо, вращающееся с постоянной скоростью, и неосесимметричный выхлопной патрубок. Течение идеального газа описывается полной системой уравнений Эйлера, представленных в интегральной форме законов сохранения [1, 2]. Динамическая модель колеблющейся лопатки с использованием модального подхода приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных форм [7].

Численный анализ

Расчетная область включает четыре подобласти: статор, ротор, осесимметричный диффузор и неосесимметричный выхлопной патрубок [6]. В каждой из подобластей аэродинамические и геометрические характеристики описываются в абсолютной или относительной (для ротора) декартовой системе координат.

В общем случае направляющий аппарат и рабочее колесо имеют неравное количество лопаток. Учитывая неперIODичность потока в окружном направлении на шаге рабочего колеса, в расчетную область следует включать все межлопаточные каналы статора и ротора. В рассматриваемом варианте соотношение чисел лопаток статора и ротора равно 48 : 53.

На рис. 1, 2 показаны разностные сетки для межлопаточных каналов статора и ротора в меридиональной плоскости (рис. 1) и тангенциальной плоскости (рис. 2). Каждый канал включает H -сетку плотностью $30 \times 52 \times 69 = 107640$ ячеек в статорной области и H -сетку плотностью $30 \times 48 \times 70 = 100800$ ячеек в области ротора. H -сетки в статорных каналах и внешние H -сетки в роторных каналах остаются недеформируемыми в течение всего расчета, в то время как внутренние H -сетки в роторных каналах деформируются на каждом шаге по времени в соответствии с движением рабочей лопатки.

На рис. 3 приведены графики распределения по высоте лопатки заторможенного давления в абсолютной системе координат (P_0), заторможенного давления в относительной системе координат (P_{0w}) и статического давления в конденсаторе (P_k) для двух режимов.

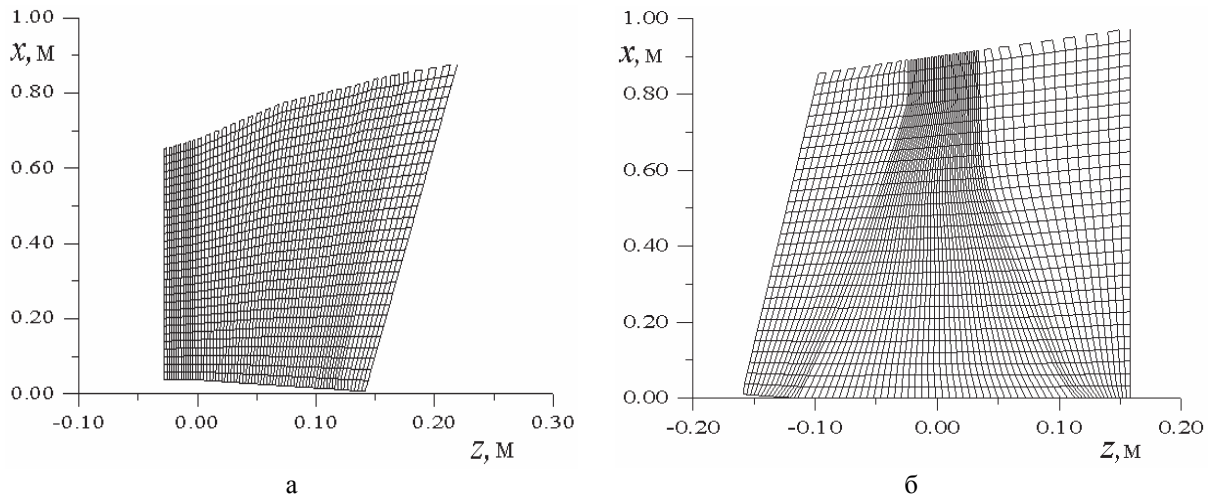


Рис. 1 – Разностная сетка в меридиональной плоскости:
а – статор; б – ротор

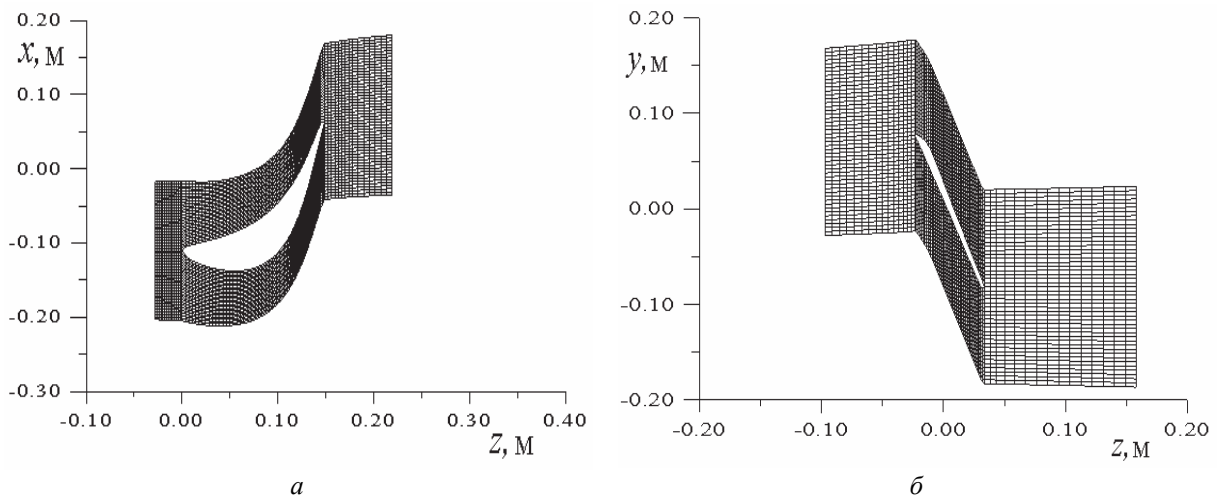


Рис. 2 – Разностная сетка в тангенциальной плоскости:
а – статор; б – ротор

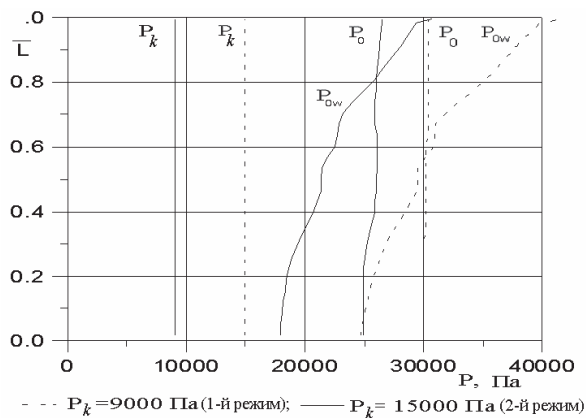


Рис. 3 – Распределение заторможенного давления в абсолютной системе координат (P_0), в относительной системе координат (P_{0w}) и статического давления в конденсаторе (P_k)

В результате расчета пространственного потока через ступень с учетом выхлопного патрубка для двух режимов ($P_k = 9000$ Па и $P_k = 15000$ Па) получено распределение статического давления за рабочим колесом. На рис. 4 приведено распределение статического давления в корневом и периферийном сечениях в окружном направлении за рабочим колесом для двух режимов. Из рисунка следует, что неравномерность в распределении давления за рабочим колесом включает шаговую неравномерность (высокочастотная неравномерность) и неравномерность, вызванную неосесимметричным патрубком (низкочастотная неравномерность). При этом пульсации давления как в корневом сечении, так и в периферийном сечении во 2-ом режиме выше, чем в 1-ом режиме.

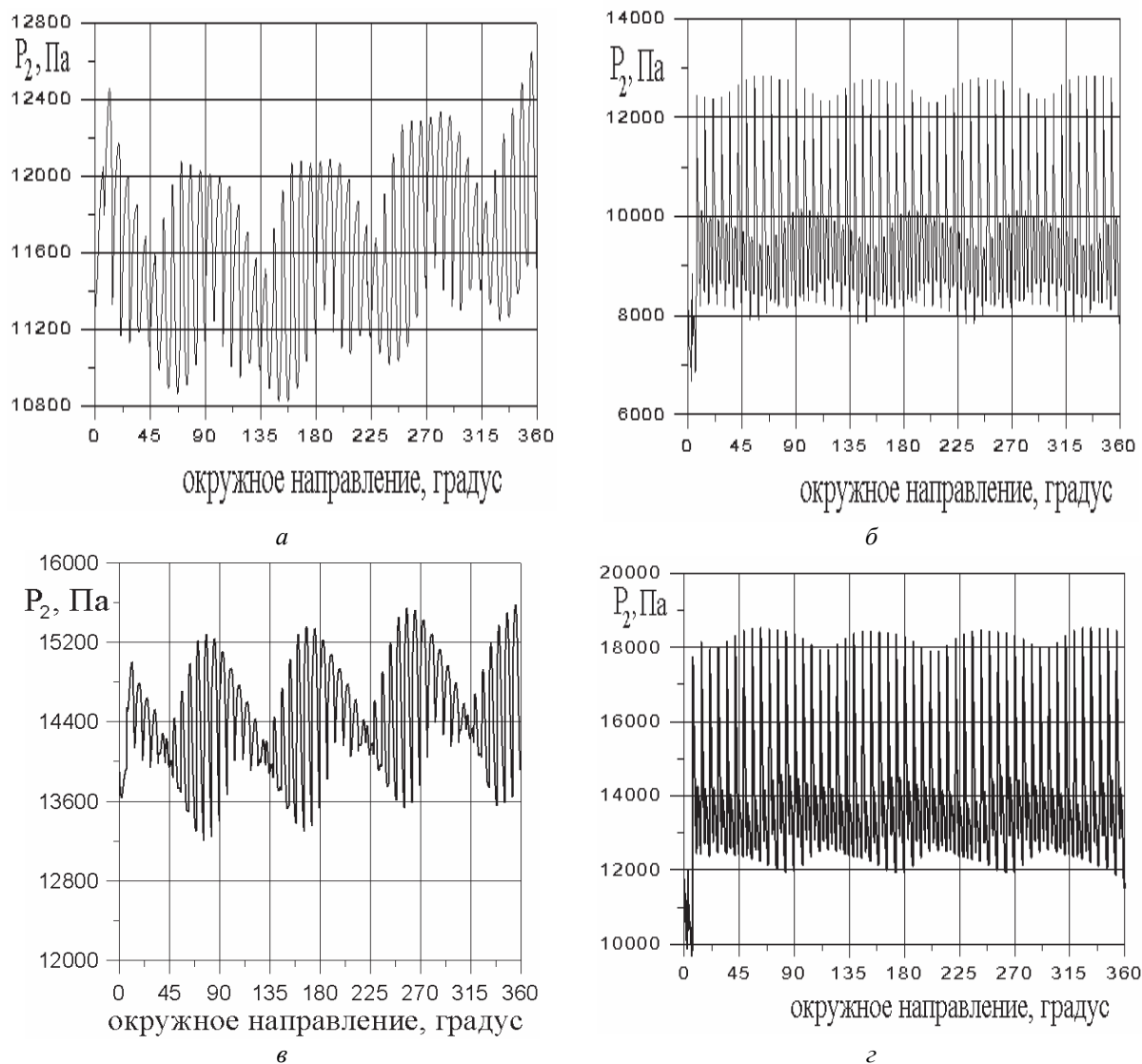


Рис. 4 – Распределение статического давления в окружном направлении за лопаточным венцом:
 а – корневое сечение, $P_2 = 9000$ Па; б – периферийное сечение, $P_2 = 9000$ Па;
 в – корневое сечение, $P_2 = 15000$ Па; г – периферийное сечение, $P_2 = 15000$ Па

На рис. 5 представлены графики нестационарной аэродинамической нагрузки, действующей на периферийный слой рабочей лопатки в окружном направлении и амплитудно-частотные характеристики для двух режимов в течение десяти оборотов ротора. Как следует из графиков, основной вклад в нестационарные аэродинамические нагрузки вносят низкочастотная составляющая ($\nu = 50$ Гц), соответствующая окружной неравномерности потока, низкочастотная составляющая ($\nu = 90$ Гц), соответствующая колебаниям лопатки по 1-й собственной форме и высокочастотная составляющая ($\nu = 2400$ Гц), соответствующая шаговой неравномерности потока. Второй режим ($P_k = 15000$ Па) характеризуется более высоким значением средней загрузки и амплитудной низкочастотной пульсации по сравнению с первым ре-

жимом ($P_k = 9000$ Па).

Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки в окружном направлении и амплитудно-частотные спектры перемещений в течение 10 оборотов ротора показаны на рис. 6. Колебания лопаток представляют собой устойчивые автоколебания. Основной вклад в изгибные колебания лопаток (h_y) вносят гармоники с частотой, близкой к частоте 1-й собственной формы. Во 2-ом режиме средняя величина деформации и амплитуда колебаний выше, чем в 1-ом режиме. Вынужденные высокочастотные колебания лопаток в обоих режимах являются пренебрежимо малыми.

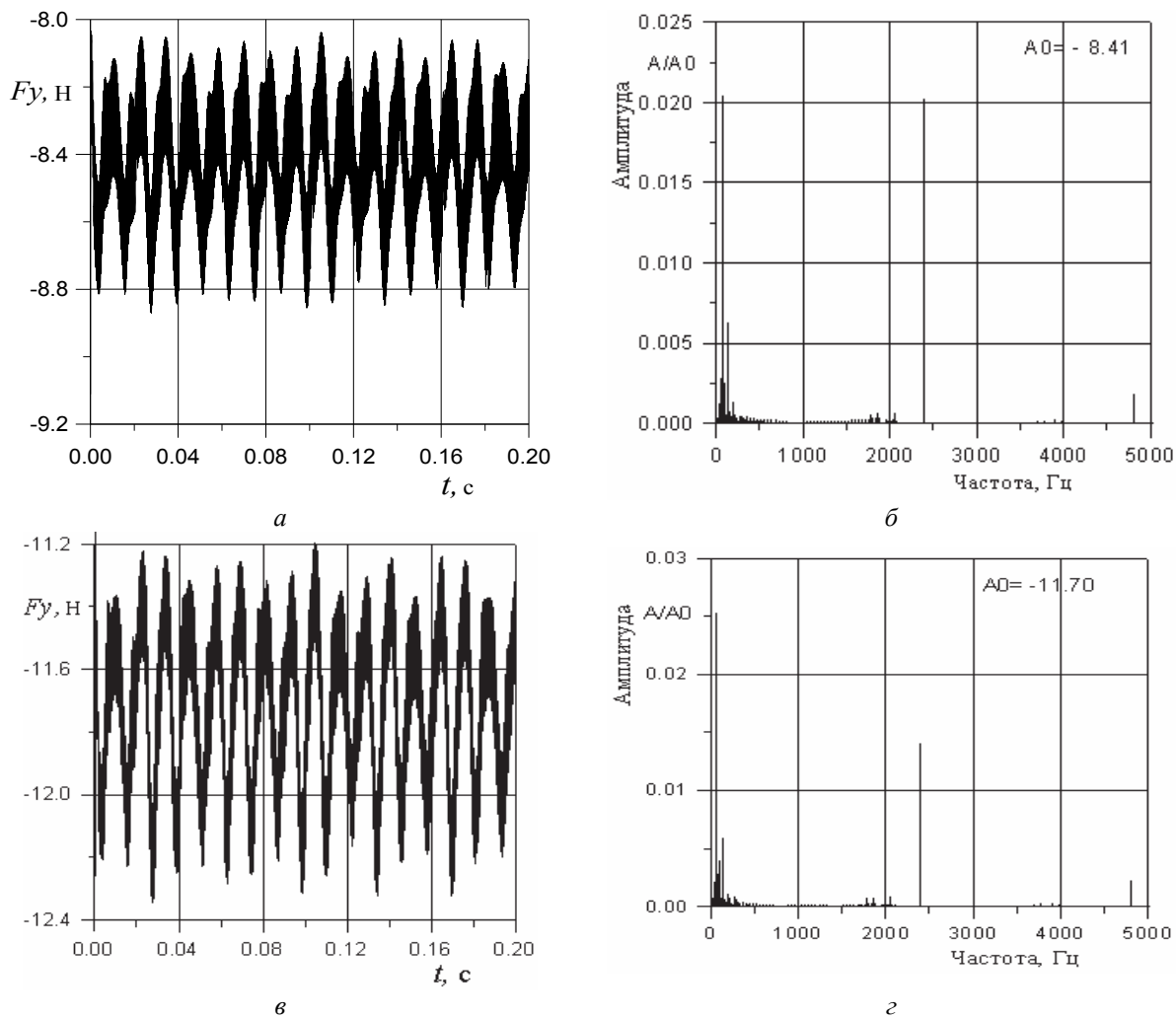
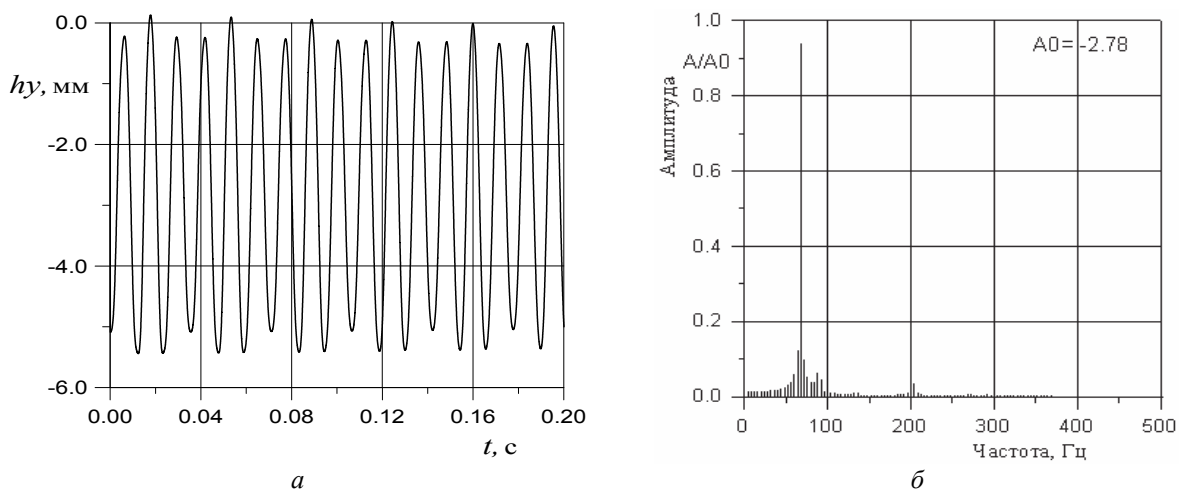


Рис. 5 – Изменение нестационарной аэродинамической силы, действующей на периферийный слой лопатки ротора в окружном направлении:

а – окружная сила; б – амплитудно-частотный спектр ($P_k = 9000$ Па);
 в – окружная сила; г – амплитудно-частотный спектр ($P_k = 15000$ Па)



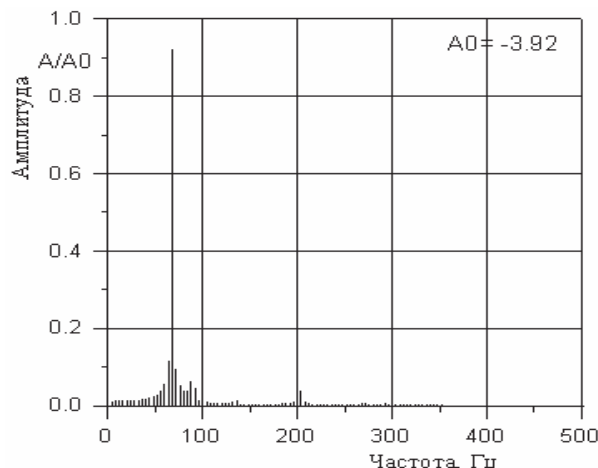
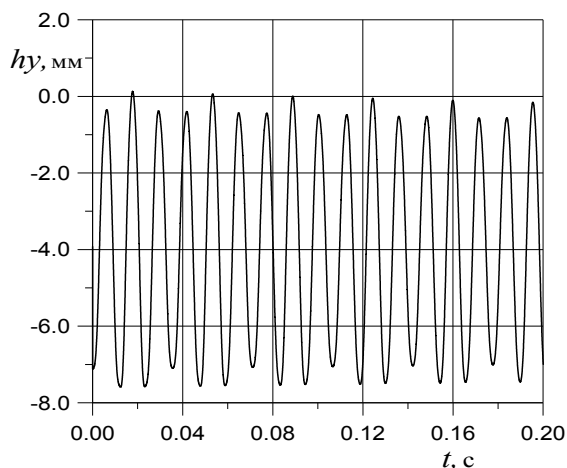


Рис. 6 – Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки ротора
 а – в окружном направлении; б – амплитудно-частотный спектр ($P_k = 9000 \text{ Па}$);
 в – в окружном направлении; г – амплитудно-частотный спектр ($P_k = 15000 \text{ Па}$)

Выводы

Проведен сравнительный численный анализ влияния неосесимметричного выхлопного патрубка на аэроупругое поведение лопаточного венца ротора последней ступени турбомашин для двух режимов работы $P_k = 9000 \text{ Па}$ и $P_k = 15000 \text{ Па}$.

Второй режим характеризуется более высокими значениями аэродинамических нагрузок и амплитуд колебаний лопаток.

Основной вклад в аэродинамические нагрузки вносят высокочастотные гармоники (2400 Гц), вызванные шаговой неравномерностью, и низкочастотные гармоники (50 Гц, 90 Гц), вызванные окружной неравномерностью потока за ротором и колебаниями лопаток.

Основной вклад в колебания лопаток вносят автоколебания с частотой близкой к частоте 1-ой собственной формы.

Предложенный метод позволяет прогнозировать режимы колебаний лопаток, включая вынужденные колебания, автоколебания, флаттер с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Список литературы

- 1 Gnesin, V. I. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya // J. Problems in Mash. Eng. – 1999. – Vol. 1, No. 2. – P. 65–76.
- 2 Gnesin, V. I. A numerical modelling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya, R. Rzadkowski // Journal of Fluid and Structure. – 2004. – No. 19. – P. 1141–1153.
- 3 Rzadkowski R. Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine / R. Rzadkowski, V. I. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // Proceedings of the 14th Interna-

- tional Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines ISUAAAT14 8-11, September 2015, Stockholm, Sweden. – 2015. – I14-S1-4, P. 1–6.
- 4 Gnesin, V. I. Numerical Modelling of fluid – structure interaction in a turbine stage for 3D viscous flow in nominal and off-design regimes / V. I. Gnesin, R. Rzadkowski, L. V. Kolodyazhnaya // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2010. – Glasgow, UK, 2010. – GT2010-23779. – P. 1–9.
- 5 Гнесин, В. И. Влияние парциального подвода в трехступенчатом отсеке осевого компрессора на нестационарные нагрузки и колебания рабочих лопаток / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски, А. А. Колесник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 11(1054). – С. 43–52. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X.
- 6 Гнесин, В. И. Численный анализ трёхмерного нестационарного потока идеального газа в последней ступени турбомашин с учётом неосесимметричного выхлопного патрубка / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 8(1180). – С. 47–53. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.06.
- 7 Гнесин, В. И. Аэроупругие явления в турбомашин / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Аэрогидродинамика и Аэроакустика: Проблемы и перспективы. – 2009. – № 3. – С. 53–62.

Bibliography (transliterated)

- 1 Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V. (1999), "Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow", *J. Problems in Mash. Eng.*, Vol. 1, No. 2, pp. 65–76.
- 2 Gnesin, V. I., Kolodyazhnaya, L. V. and Rzadkowski, R. (2004), "A numerical modelling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades", *Journal of Fluid and Structure*, No. 19, pp. 1141–1153.
- 3 Rzadkowski R., Gnesin, V.I., Kolodyazhnaya, L.V.

- (2015), "Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine", *Proceedings of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines ISUAAAT14 8-11, September 2015, Stockholm, Sweden, I14-S1-4*, pp. 1–6.
- 4 **Gnesin, V. I., Kolodyazhnaya, L. V. and Rzadkowski, R.** (2010), "Numerical Modelling of fluid – structure interaction in a turbine stage for 3D viscous flow in nominal and off-design regimes", *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2010, Glasgow, UK, GT2010-23779*, pp. 1–9.
 - 5 **Gnesin, V. I., Kolodyazhnaya, L. V., Rzadkowski, R. and Kolisnyk O. O.** (2014), "The Influence Produced on the Nonstationary Loadings and Vibrations of the Blades by the Partial Input into the Three-Stage Compartment of Axial Compressor" *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1054), pp. 43–52, ISSN 2078-774X.
 - 6 **Gnesin, V., Kolodyazhnaya, L. and Rzadkowski, R.** (2016), "Numerical Analysis of the Three-Dimensional Nonstationary Flow of Ideal Gas in the Last Stage of Turbine Machine Taking into Consideration the Nonaxisymmetric Exhaust Pipe Branch", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1180), pp. 47–53, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.06.
 - 7 **Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V.** (2009), "Aerоупругие явления в турбомашине [The aeroelastic phenomena in the turbomachines]", *Aerogidrodinamika i Aeroakustika: Problemy i perspektivy [Aerogidrodinamic and Aeroacoustics: Problems and prospects]*, No. 3, pp. 53–62.

Сведения об авторах (About authors)

Гнесин Виталий Исаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела гидроаэромеханики энергетических машин, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0001-6411-6158

Gnesin Vitaly Isayevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Колодяжная Любовь Владимировна – доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела гидроаэромеханики энергетических машин, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: lyubovvladimirovna60@gmail.com, ORCID 0000-0001-5469-4325.

Kolodyazhnaya Lyubov Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Жандковски Ромуальд – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом динамики и аэроупругости, Институт проточных машин ПАН, г. Гданьск, Польша; e-mail: z3@imp.gda.pl, ORCID 0000-0002-0560-1222.

Rzadkowski Romuald – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Dynamics and Aeroelasticity, The Institute flow machines PAN, Gdansk, Poland.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гнесин, В. И. Влияние противодавления на аэроупругие колебания лопаточного венца последней ступени турбомашин в трехмерном потоке идеального газа / **В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 13–19. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.02.

Please cite this article as:

Gnesin, V. I., Kolodyazhnaya, L.V. and Rzadkowski, R. (2017), "Influence of the Backpressure on the Aeroelastic Vibrations of the Blade Ring at the Last Stage of Turbine Machine in the 3D Flow of an Ideal Gas", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 13–19, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.02.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гнесин, В. І. Вплив протитиску на аероупругі коливання лопаткового вінця останнього ступеня турбомашини в тривимірному потоці ідеального газу / **В. І. Гнесин, Л. В. Колодяжна, Р. Жандковскі** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 13–19. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.02.

АНОТАЦІЯ Проведено чисельний аналіз аероупругої поведінки лопаткового апарату останнього ступеня турбомашини при різних значеннях тиску в конденсаторі з урахуванням нерівномірності потоку, викликаної лопатками статора і нерівномірним в окружному напрямку розподілом тиску за робочим колесом через неосесиметричний патрубков, а також нестационарних ефектів, викликаних коливаннями лопаток. Запропонований метод розв'язання зв'язаної задачі дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток, включаючи вимушені, самозбудні коливання і автоколивання з метою підвищення економічності і надійності лопаток апаратів турбомашин.

Ключові слова: останній ступень турбомашини, вихлопний патрубок, тривимірний нестационарний потік, чисельне моделювання.

Поступила (received) 15.02.2017