

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

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТРЁХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА
ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ С УЧЁТОМ
НЕОСЕССИМЕТРИЧНОГО ВЫХЛОПНОГО ПАТРУБКА**

АННОТАЦИЯ Представлены результаты численного моделирования трехмерного потока идеального газа через последнюю ступень турбомашин с учетом неравномерности потока, вызванной направляющими лопатками, неосесимметричным патрубком, и нестационарных эффектов, вызванных колебаниями лопаток. Представленный метод решения связанной аэроупругой 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 ЦНД, выхлопной патрубок, трехмерный идеальный поток, численное моделирование, нестационарные нагрузки, аэроупругие характеристики

V. GNESIN, L. KOLODYAZHNAYA, R. RZADKOWSKI

**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**

ABSTRACT A problem related to the forecast of the aeroelastic behavior and aeroelastic instability of blades (in particular self-oscillations, flutter, and resonance vibrations) becomes of great importance for the development of high-loaded compressor and vent rows and the last turbine stages whose long and flexible blades can be exposed to such phenomena. The solution of this problem requires the development of new models for the nonstationary three-dimensional flow, the use of contemporary numeric methods and the comparison of theoretical and experimental data. This scientific paper gives the data of numerical simulation of the 3-D flow of ideal gas passing through the last stage of turbine machine taking into account the flow nonuniformity caused by guide blades and nonuniform pressure distribution in the exhaust pipe branch and also nonstationary effects caused by blade vibrations. The numerical method is based on the solution of combined aeroelastic problem for the 3-D flow of ideal gas passing through the turbine stage and the nonaxisymmetric exhaust pipe branch including the annular diffuser. To solve the combined problem a partially integral method was used that includes integral equations of gas dynamics (Euler equations) and vibrating blade dynamics (modular approach) at each time step with the information exchange. The given method of the solution of combined aeroelastic problem allows us to predict the amplitude-frequency spectrum of blade vibrations in the three-dimensional flow of ideal gas including forced self-excited vibrations and self-vibrations to increase efficiency and reliability of the blade units of turbine machines.

Key words: the last stage of low pressure cylinder (LPC), exhaust pipe branch, three dimensional ideal flow, numerical simulation, nonstationary loads, and aeroelastic characteristics.

Введение

Нестационарные аэродинамические и аэроупругие явления оказывают существенное влияние на предельную мощность, надежность и эффективность работы турбомашин [1].

Проблема прогнозирования аэроупругого поведения лопаток и аэроупругой неустойчивости (автоколебания, флаттер, резонансные колебания) приобретает особую важность при разработке высоконагруженных компрессорных и вентиляторных венцов, а также последних ступеней турбин, длинные и гибкие лопатки которых могут быть подвержены этим явлениям. Решение данной проблемы требует разработки новых моделей нестационарного пространственного течения, использования современных численных методов, сопоставления теоретических исследований с экспериментальными данными [2, 3].

В последнее время развиты новые подходы

для исследования аэроупругого поведения лопаточных венцов в трёхмерном потоке идеального [4–6] или вязкого газа [7], основанные на последовательном интегрировании во времени уравнений движения газа и колебаний лопаток с обменом информацией на каждой итерации.

Авторами разработаны численный метод и алгоритм решения связанной задачи взаимного обмена энергией между нестационарным потоком газа и колеблющимися лопатками, который позволяет моделировать аэроупругое поведение лопаточных венцов, включая самовозбуждающиеся колебания лопаток [4–7]. Разработанный метод решения связанной аэроупругой задачи позволяет прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток в трехмерном потоке идеального газа, включая вынужденные, самовозбуждающиеся колебания и автоколебания с целью повышения экономичности и надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Цель работы

Целью настоящей работы является численный анализ трехмерного потока газа через ступень турбомашин и колебаний лопаток с учетом неравномерности потока, вызванной как направляющими лопатками статора, так и неравномерным распределением давления за рабочим колесом, вызванным неосесимметричным выхлопным патрубком.

Постановка задачи

Трёхмерный трансзвуковой поток невязкого нетеплопроводного газа через последнюю ступень осевой турбины рассматривается в физической области, включающей направляющий аппарат статора, рабочее колесо и неосесимметричный выхлопной патрубок. Течение идеального газа описывается полной системой нестационарных уравнений Эйлера, представленной в интегральной форме законов сохранения [4, 5]. Учитывая неперIODичность потока в окружном направлении, в расчетную область следует включать все лопатки статора и ротора. Соотношение чисел лопаток статора и ротора в рассматриваемом варианте равно 48:53.

Расчётная область включает четыре подобласти: статор, ротор, осесимметричный диффузор и неосесимметричный выхлопной патрубок (рис. 1–3). В каждой из подобластей аэродинамические и геометрические характеристики описываются в абсолютной или относительной (для ротора) декартовой системе координат.

На рис. 1, 2 показаны разностные $H-H$ сетки для статора, ротора и выхлопного патрубка в меридиональной плоскости $x-z$ (рис. 1) и в плоскости перпендикулярной к оси вращения $x-y$ за рабочим колесом (рис. 2). Разностная сетка содержит

5160720 ячеек в статорной подобласти, 5241600 ячеек в роторной подобласти и 6739200 ячеек в выхлопном патрубке. Суммарная плотность разностной сетки в расчетной области составляет 17147520 ячеек.

На рис. 3 показан фрагмент разностной сетки в тангенциальной плоскости ($y-z$) для периферийного сечения турбинной ступени. В подобласти, включающей пересечение разностных сеток в осевом зазоре, происходит обмен информацией между аэродинамическими характеристиками неподвижного статора и вращающегося ротора.

Для численного интегрирования исходных уравнений применяется разностная схема Годунова-Колгана 2-го порядка точности по координатам и времени, обобщённая на случай произвольной пространственной деформируемой разностной сетки [8].

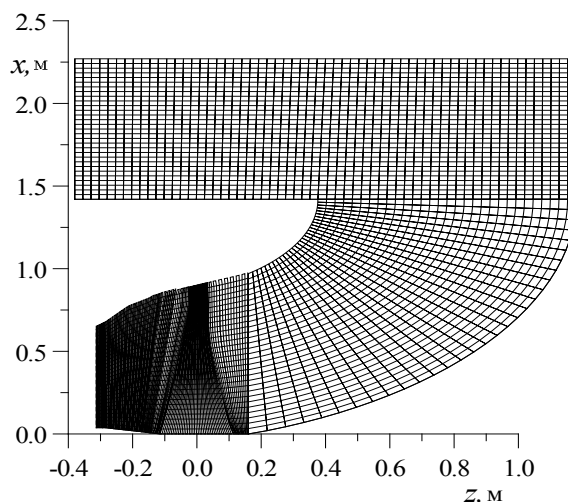


Рис. 1 – Разностная сетка для статора, ротора и выхлопного патрубка в меридиональной плоскости (плоскости $x-z$)

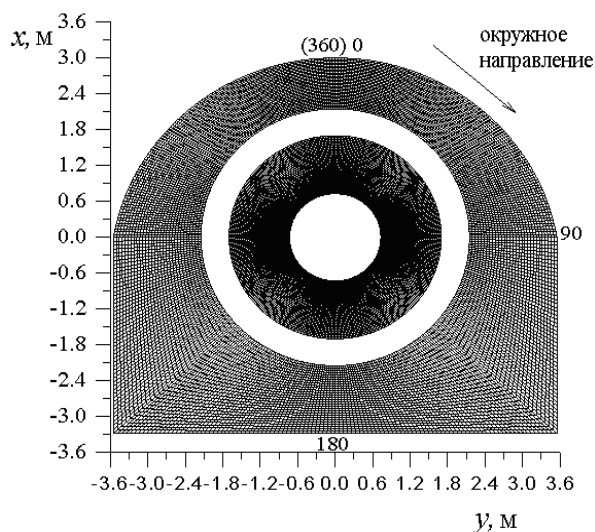


Рис. 2 – Разностная сетка для выхлопного патрубка в плоскости перпендикулярной оси вращения (плоскости $x-y$)

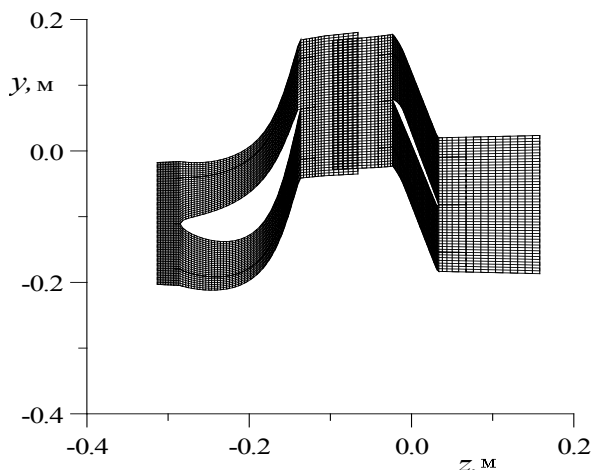


Рис. 3 – Разностная сетка в периферийном сечении турбинной ступени (плоскость $y-z$)

Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик. В качестве граничных условий принимаются:

- на входе – давление и температура заторможенного потока, меридиональный и тангенциальный углы потока;
- на выходе – статическое давление в конденсаторе.

Граничные условия дополняются соотношениями на характеристиках во входном и выходном сечениях расчётной области [4–6].

Динамическая модель колеблющейся лопатки описывается с использованием модального подхода [4–7].

Алгоритм решения связанной задачи основан на последовательном по времени интегрировании уравнений газодинамики и уравнений колебаний роторных лопаток с обменом информацией на каждой итерации.

Численный анализ

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

- нестационарный трёхмерный поток идеального газа через статор, ротор и выхлопной патрубок без учета колебаний лопаток (аэродинамическая задача, режим 1);
- нестационарный трехмерный поток идеального газа через статор, ротор и выхлопной патрубок с учетом колебаний рабочих лопаток (связанная аэроупругая задача, режим 2).

В качестве граничных условий приняты:

- число оборотов ротора $n = 3000$ об/мин;
- давление и температура заторможенного потока на входе в статор $P_0 = 39200$ Па; $T_0 = 348^\circ\text{K}$;
- углы потока на входе в статор в тангенциальной (α) и меридиональной (γ) плоскостях;

– статическое давление за выхлопным патрубком (в конденсаторе) $P_2 = 10300$ Па.

При расчете колебаний лопаток ротора учитывались первые шесть собственных форм колебаний. Собственные частоты для каждой из собственных форм приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Собственные частоты

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

На первом этапе выполнен расчет трехмерного нестационарного потока без учета колебаний лопаток в течение одного оборота ротора (режим 1).

Графики распределения по высоте лопатки полного давления в абсолютной системе координат на входе в ступень (P_0), полного давления в относительной вращающейся системе координат (P_{0w}), статического давления за ротором (P_2) и статического давления в осевом зазоре между статором и ротором (P_1) приведены на рис. 4.

На рис. 5 показано распределение статического давления за рабочим колесом в окружном направлении на полной дуге окружности. Угол «0» соответствует сечению $y = 0$; $x > 0$ в плоскости x , y (см. рис. 2). Неравномерность в распределении статического давления вызвана шаговой неравномерностью в каналах ротора.

Мгновенное распределение скорости (число Маха) по обводу профиля рабочей лопатки в корневом, среднем и периферийном сечениях представлено на рис. 6. Течение в канале ротора характеризуется трансзвуковыми скоростями ($M \sim 0,8-1,6$) и отсутствием зон отрыва потока.

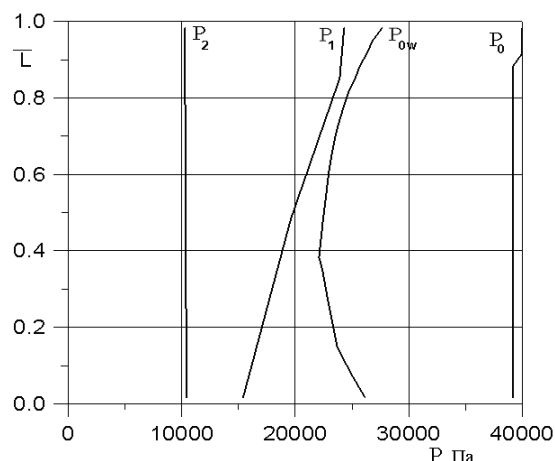
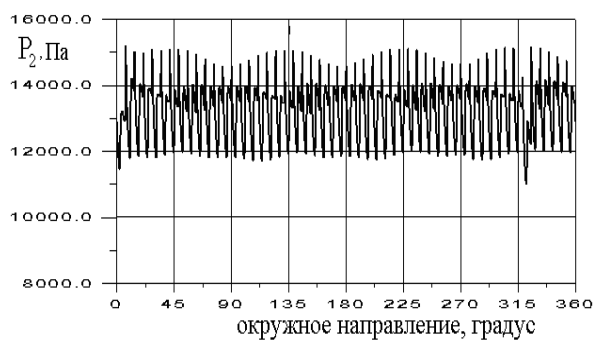


Рис. 4 – Распределение давления по высоте лопатки

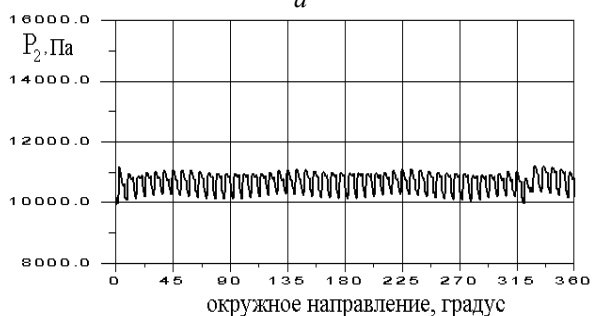
На рис. 7 представлены графики нестационарных аэродинамических нагрузок (окружная, осевая и аэродинамический момент), действующих на периферийный слой рабочей лопатки в

течение пяти оборотов ротора с учётом колебаний лопаток, а также их амплитудно-частотные спектры. Как следует из графиков, основной вклад в нестационарные аэродинамические нагрузки вносят высокочастотная гармоника, вызванная шаговой неравномерностью потока за статором ($v_{рот} \times z_{ст} = 50 \times 48 = 2400$ Гц, где $v_{рот}$ – частота вращения ротора, $z_{ст}$ – число лопаток статора), низкочастотная гармоника с частотой 50 Гц, вы-

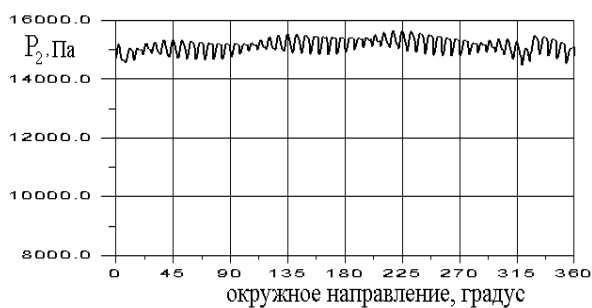
званная неравномерностью в окружном направлении за ротором, и гармоника с частотой ~ 110 Гц, вызванная колебаниями лопаток по 1-й собственной форме. Наибольший вклад вносит низкочастотная гармоника (50 Гц), амплитуда которой составляет для окружной силы 2 %, для осевой силы 4,5 %, для аэродинамического момента 9 % от средних значений аэродинамических нагрузок.



а



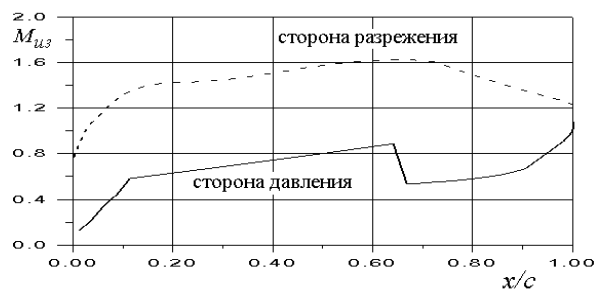
б



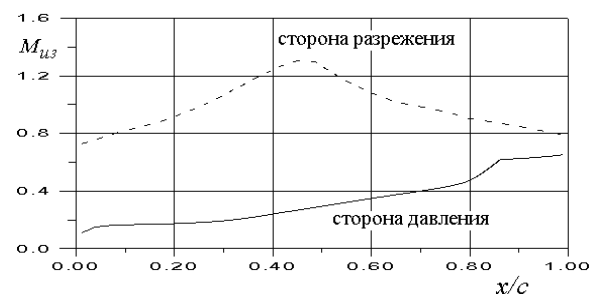
в

Рис. 5 – Распределение статического давления в окружном направлении за ротором: а – периферийное сечение; б – среднее сечение; в – корневое сечение

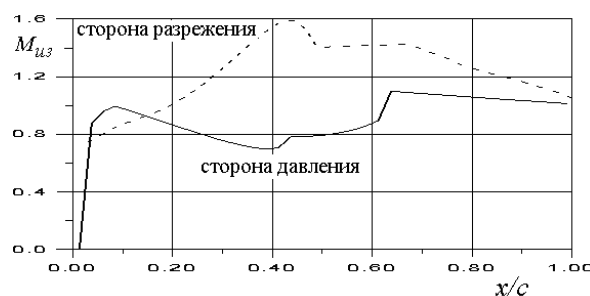
Перемещения периферийного сечения рабочей лопатки в окружном, осевом направлениях и поворот относительно центра тяжести, а также их амплитудно-частотные спектры показаны на рис. 8. Основной вклад в изгибные колебания лопаток (h_y, h_z) вносят гармоники с частотой 100 Гц, близкой к частоте 1-й собственной формы, в кру-



а



б



в

Рис. 6 – Мгновенное распределение скорости по обводу профиля рабочей лопатки: а – периферийное сечение; б – среднее сечение; в – корневое сечение

тильные колебания (φ) – гармоники с частотами 100 Гц (1-я собственная форма колебаний), 160 Гц (2-я собственная форма колебаний) и 230 Гц (3-я собственная форма колебаний). Следует обратить внимание, что вынужденные высокочастотные колебания являются пренебрежимо малыми.

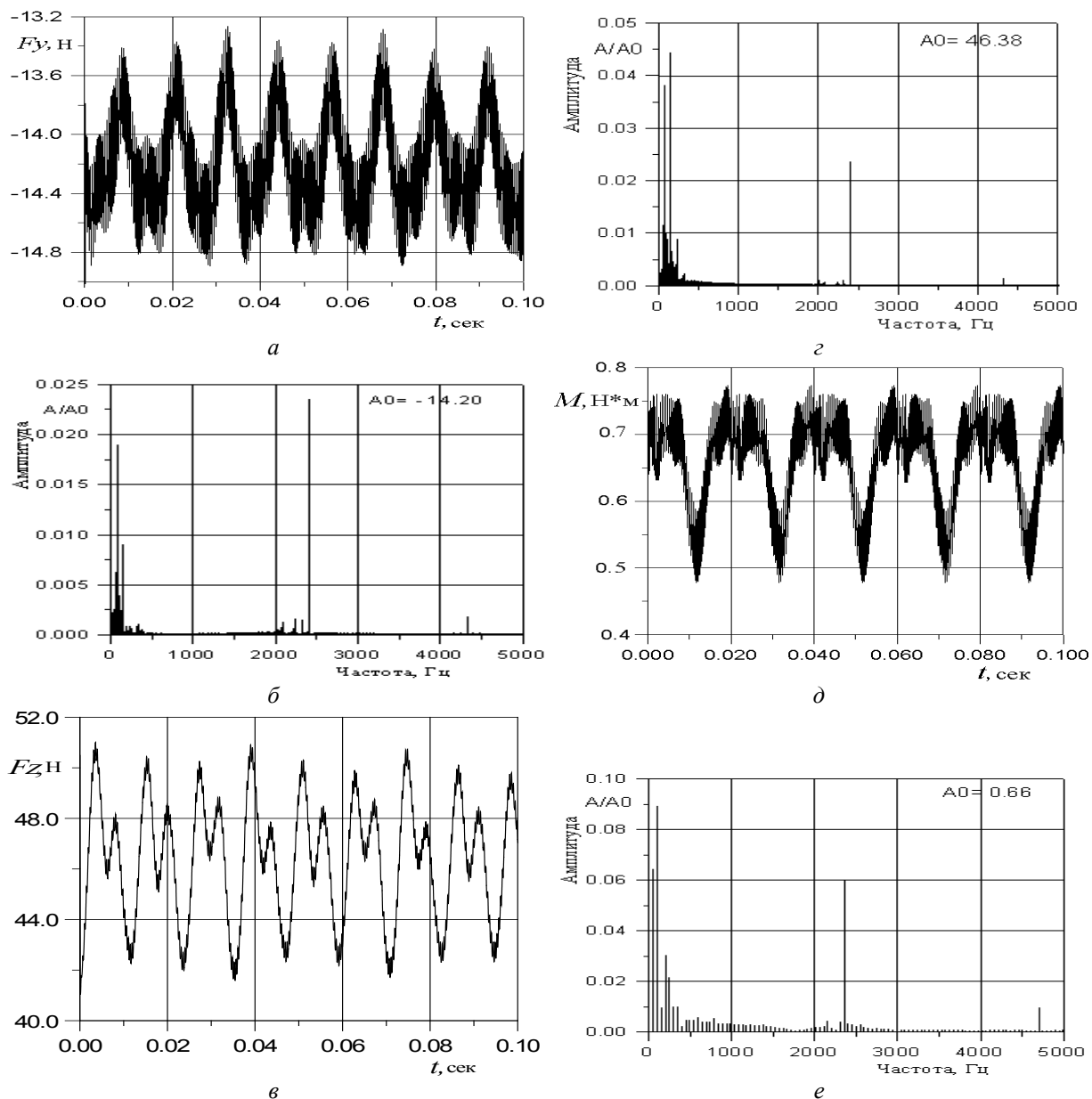
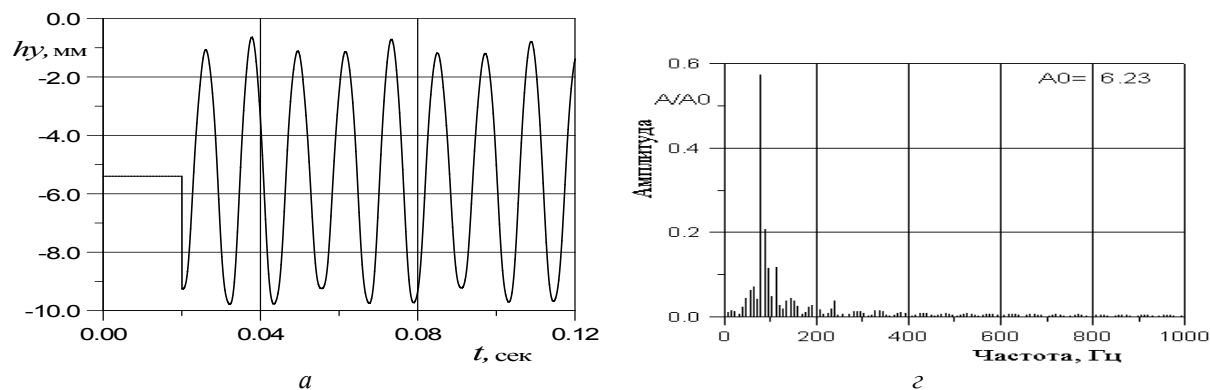


Рис. 7 – Изменение нестационарной аэродинамической силы, действующей на периферийный слой лопатки ротора: а – окружная сила; в – осевая сила; д – аэродинамический момент; б, з, е – амплитудно-частотный спектр



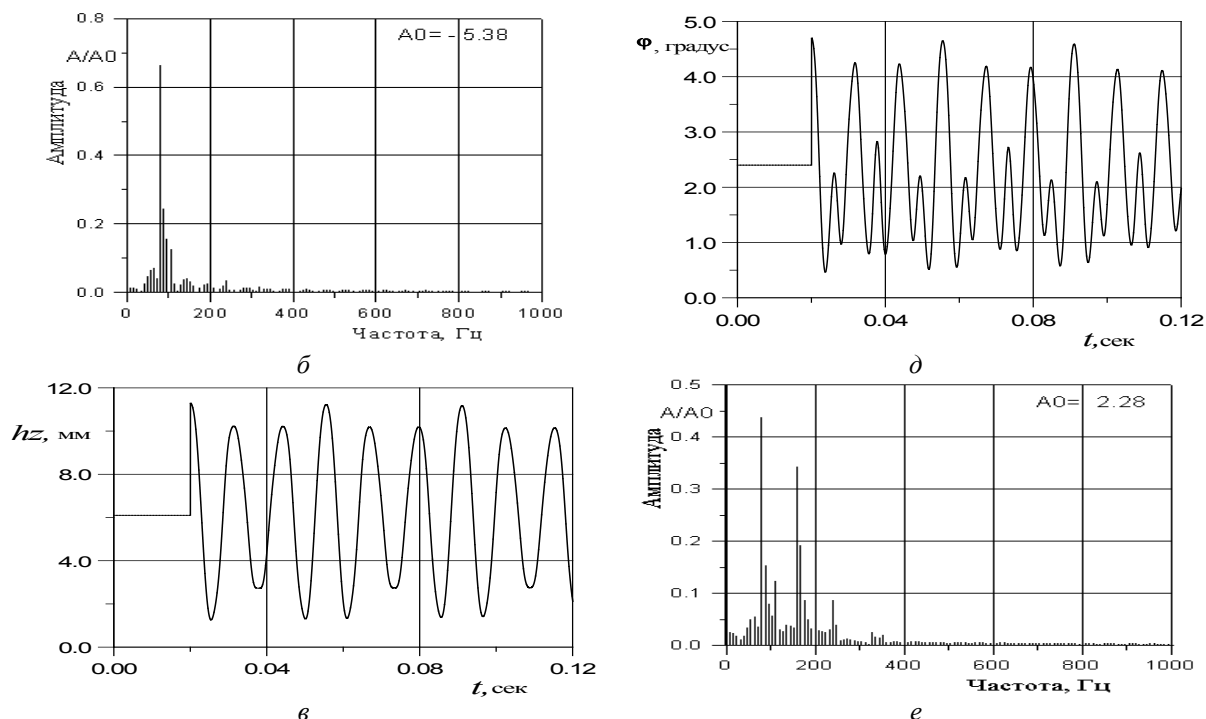


Рис. 8 – Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки ротора: а – в окружном направлении; в – в осевом; д – угол поворота относительно центра тяжести; б, г, е – амплитудно-частотный спектр

Выводы

Выполнен численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца ротора последней ступени осевой турбины при неравномерном распределении давления за ступенью.

Показано, что основной вклад в нестационарные аэродинамические нагрузки определяется высокочастотной гармоникой (2400 Гц), вызванной шаговой неравномерностью потока за лопатками статора и низкочастотной гармоникой (50 Гц), вызванной окружной неравномерностью потока за ротором.

Основной вклад в колебания лопаток вносят низкочастотная гармоника 50 Гц и автоколебания с частотой ~ 100 Гц.

Предложенный метод позволяет прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток осевой турбины, включая вынужденные и самовозбуждающиеся вибрации (флаттер, автоколебания).

Список литературы

- 1 Гнесин, В. И. Аэроупругие явления в турбомашинах [Текст] / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Аэродинамика и Аэроакустика. Проблемы и перспективы : Сб. научных трудов. – Харьков : ХАИ, 2009. – № 3. – С. 53–62.
- 2 Cinnella, P. A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity [Text] / P. Cinnella, De Palma, G. Pascazio, M. Napolitano // Journal of Turbomachinery. – 2004. – April, Vol. 126. – P. 310–316.
- 3 Bolcs, A. Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results [Text]

- / A. Bolcs, T. H. Fransson // Communication du LTAT. – EPFL Switzerland, 1986. – № 13. – P. 174.
- 4 Gnesin, V. I. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow [Text] / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya // J. Problems in Mash. Eng. – 1999. – Vol. 1, No. 2. – P. 65–76.
- 5 Гнесин, В. И. Аэроупругое поведение последней ступени турбомашин на номинальном и частичном режимах [Текст] / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Пробл. машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 1. – С. 48–57.
- 6 Gnesin, V. I. A numerical modelling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades [Text] / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya, R. Rzdakowski // Journal of Fluid and Structure. – 2004. – No. 19. – P. 1141–1153.
- 7 Гнесин, В. И. Численный анализ влияния соотношения чисел лопаток статора и ротора на нестационарные нагрузки и режимы колебаний лопаток [Текст] / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2009. – № 3. – С. 23–32. – Бібліогр. : 12 назв. – ISSN 2078-774X.
- 8 Годунов, С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайков, Г. П. Прокопов. – М. : Наука, 1976. – 400 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V. (2009), "Ajerouprugie javlenija v turbomashinah [The Aeroelastic phenomena in the turbomachines]", *Ajerodinamika i Ajerookustika. Problemy i perspektivy [Aerodynamics and Aeroacoustics. Problems and prospects]*, no. 3, pp. 53–62.

- 2 **Cinnella, P., Palma, De, Pascazio, G. and Napolitano M.** (2004), "A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity", *Journal of Turbomachinery*, vol. 126, April, pp. 310–316.
- 3 **Bolcs, A. and Fransson, T. H.** (1986), "Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results", *Communication du LTAT*, no. 13, pp. 174, EPFL Switzerland.
- 4 **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 Mach. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 65–76.
- 5 **Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V.** (2003), "Ajerouprugoe povedenie poslednej stupeni turbomashiny na nominal'nom i chastichnom rezhimah [Aeroelastic behaviour of the last stage of turbomachine on nominal and partial regimes]", *Probl. mashinostroenija [J. Problems in Mach. Eng.]*, vol. 6, no. 1, pp. 48–57.
- 6 **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.
- 7 **Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V.** (2009), "Chislennyj analiz vlijanija sootnosheniya chisel lopatok statora i rotora na nestacionarnye nagruzki i rezhimy kolebanij lopatok [The Numerical Analysis for Influence of Stator-Rotor Blade Number Ratio on Unsteady Loads and Blade Oscillations Regimes]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3, pp. 23–32, ISSN 2078-774X.
- 8 **Godunov, S. K., Zabrodin, A. V., Ivanov, M. Y., Krayko, A. N. and Prokopov, G. P.** (1976), *Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki [The Numerical solution of multidimensional tasks of gas dynamics]*, Nauka, Moscow, Russia.

Сведения об авторах (About authors)

Гнесин Виталий Исаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом нестационарной газодинамики и аэроупругости, 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, Head of Department of Unsteady Gasdynamics and Aeroelasticity, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Колодяжная Любовь Владимировна – доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела нестационарной газодинамики и аэроупругости, 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, of Department of Unsteady Gasdynamics and Aeroelasticity, 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. Численный анализ трёхмерного нестационарного потока идеального газа в последней ступени турбомашин с учётом неосесимметричного выхлопного патрубка [Текст] / **В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 47–53. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.06.

Please cite this article as:

Gnesin, V., Kolodyazhnaya, L. and Rzadkowski, R. (2016), "Numerical Analysis of the Three-Dimensional Non-stationary 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.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гнесін, В. І. Чисельний аналіз тривимірної нестационарної течії ідеального газу в останньому ступені турбомашини з урахуванням неосесимметричного патрубка [Текст] / **В. І. Гнесін, Л. В. Колодяжна, Р. Жандковски** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 47–53. – Бібліогр. : 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.06.

АНОТАЦІЯ Представлені результати чисельного моделювання тривимірного потоку ідеального газу через останній ступінь турбомашини з урахуванням нерівномірності потоку, яка викликана направляючими лопатками, неосесимметричним патрубком, і нестационарних ефектів, викликаних коливаннями лопаток. Представлений метод рішення зв'язаної аеропружної задачі дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток, включаючи вимушені коливання, самозбудні коливання та автоколивання з метою підвищення економічності і надійності лопаткових апаратів турбомашин.

Ключові слова: останній ступінь ЦНТ, вихлопний патрубок, тривимірний ідеальний потік, чисельне моделювання, нестационарні навантаження, аеропружні характеристики.

Поступила (received) 09.01.2016