

УДК 621.165

В. И. ГНЕСИН, Л. В. КОЛОДЯЖНАЯ, Р. ЖАНДКОВСКИ**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК И АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОГО В ОКРУЖНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ**

Представлены результаты численного анализа аэроупругого поведения вибрирующего лопаточного венца турбинной ступени в трехмерном потоке идеального газа с учетом неравномерного в окружном направлении распределения давления. Численный метод основан на решении связанной задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток в нестационарном пространственном потоке газа через лопаточные венцы последней ступени осевой турбины. Показано, что неравномерное в окружном направлении распределение давления на рабочем колесе влияет на нестационарные нагрузки и режимы колебаний лопаток.

Ключевые слова: численный анализ, идеальный поток, ступень осевой турбины, автоколебания, связанная задача, нестационарная нагрузка.

Введение. 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 [1].

Решение данной проблемы требует разработки новых моделей нестационарного пространственного течения газа, 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 трехмерном 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 разработан алгоритм решения связанной задачи с обменом информацией между аэродинамической и упругой задачами, (учет взаимного влияния), который позволяет корректно моделировать нестационарные нагрузки и обмен энергией при взаимодействии аэродинамического потока с колеблющимися лопатками [4–7].

Целью настоящей работы является численный анализ трехмерного потока газа через ступень турбомашин с учетом неравномерности потока, вызванной как направляющими лопатками, так и неравномерным распределением давления в окружном направлении за ступенью, и нестационарных эффектов, вызванных колебаниями лопаток.

Постановка задачи. Трехмерный трансзвуковой поток невязкого нетеплопроводного газа через ступень осевой турбины описывается полной системой нестационарных уравнений Эйлера, представленной в интегральной форме законов сохранения с постоянной угловой скоростью ω декартовой системе координат [4, 5].

Учитывая неперIODичность потока в окружном направлении, следует в расчетную область включать все лопатки статора и ротора. Геометрические и аэродинамические характеристики статора и ротора

описываются в абсолютной и относительной системах координат, жестко связанных со статором или ротором соответственно.

Разностная сетка разбивается на $(k_1 + k_2)$ – сегментов, где k_1, k_2 – взаимно простые натуральные числа, пропорциональные числам лопаток статора и ротора ($k_1 : k_2 = z_{СТ} : z_{РОТ}$). Каждый сегмент включает одну лопатку и имеет протяженность в окружном направлении, равную шагу статора или ротора. Вся расчетная область имеет угловую протяженность в окружном направлении:

$$T = \frac{2\pi}{(z_{СТ} + z_{РОТ})} \cdot (k_1 + k_2) \cdot$$

На рис. 1, 2 показаны фрагменты разностной $H-H$ сетки в меридиональной (рис. 1, а, б) и в тангенциальной плоскости (на среднем радиусе, рис. 2, а, б) для статора и ротора.

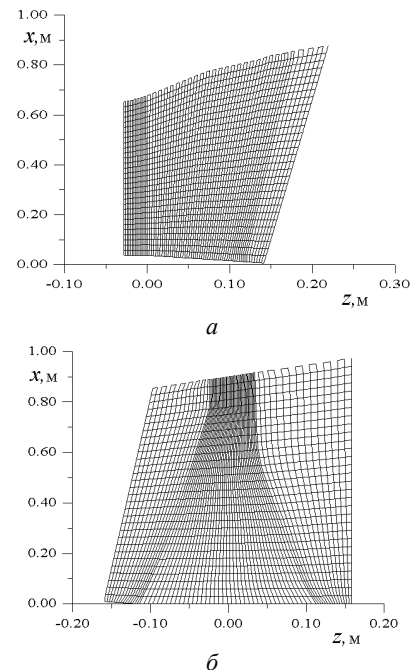


Рис. 1 – Меридиональное сечение ступени турбомашин:
а – статор; б – ротор

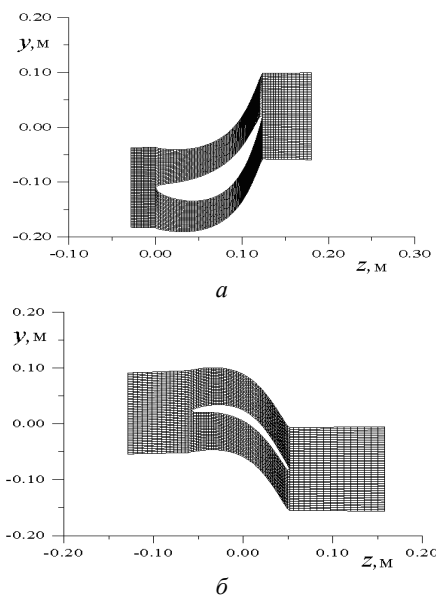


Рис. 2 – Тангенциальное сечение ступени турбомашин: а – статор; б – ротор

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

Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик.

Так как осевая скорость потока является дозвуковой, то в качестве граничных условий принимаются:

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

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

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

Численный анализ. Численный анализ проведен для последней ступени турбины мощностью 370 МВт, состоящей из 48 лопаток статора, 52 лопаток ротора. Таким образом, расчетная область (зона периодичности) включает 12 и 13 лопаток статора, ротора соответственно.

Граничные условия приняты:

- на входе в статор $P_0 = 39400$ Па; $T_0 = 348$ К;
- на выходе за ротором – статическое давление меняется вдоль радиуса как показано на рис. 3;
- углы потока на входе α и γ в тангенциальной и меридиональной плоскостях;
- число оборотов ротора $n = 3000$ мин⁻¹.

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

Таблица 1 – Собственные частоты

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

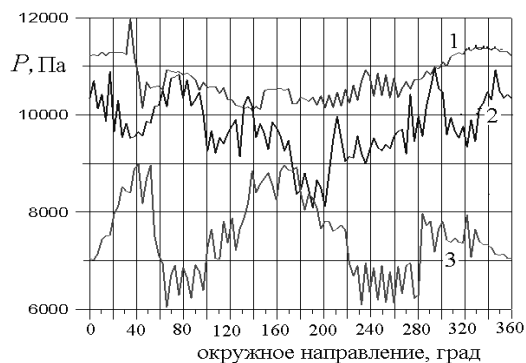


Рис.3 – Распределение статического давления в окружном направлении на выходе за рабочим колесом: 1 – в корневом сечении; 2 – в среднем сечении; 3 – в периферийном сечении

В данной работе приведены результаты численного анализа нестационарных аэродинамических характеристик турбинной ступени.

На рис. 4, а, в, д представлены графики нестационарных аэродинамических нагрузок (окружная, осевая и аэродинамический момент), действующих на периферийный слой рабочей лопатки в течение десяти полных оборотов ротора из которых один оборот без учета колебаний лопаток ротора и девять с учетом колебаний лопаток, а также их амплитудно-частотные спектры (рис. 4, б, з, е).

Амплитудно-частотные спектры построены с использованием преобразования Фурье [1].

В данном расчете частота вращения ротора $\nu_{\text{рот}} = 50$ Гц ($n = 3000$ мин⁻¹); время десяти оборотов ротора 0,2 с.

Как видно из графиков, основной вклад в нестационарные составляющие аэродинамических нагрузок вносят высокочастотная гармоника, вызванная шаговой неравномерностью потока за статором ($\nu_{\text{рот}} \times z_{\text{СТ}} = 50 \times 48 = 2400$ Гц, где $z_{\text{СТ}}$ – число лопаток статора), низкочастотная гармоника с частотой 50 Гц, вызванная неравномерностью в окружном направлении за ротором, и гармоника с частотой ~ 100 Гц, вызванная колебаниями лопаток по 1-й собственной форме.

Амплитуда гармоники с частотой 50 Гц для окружной силы в периферийном сечении составляет 12 %, для осевой силы – 9 %, аэродинамического момента – 24 %.

Амплитуда гармоники с частотой ~ 100 Гц для окружной силы в периферийном сечении составляет 2 %, для осевой силы – 9 %, аэродинамического момента – 11 %. Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки в окружном, осевом направлениях и поворот относительно центра тяжести в номинальном режиме, а также их амплитудно-частотные спектры показано на рис. 5.

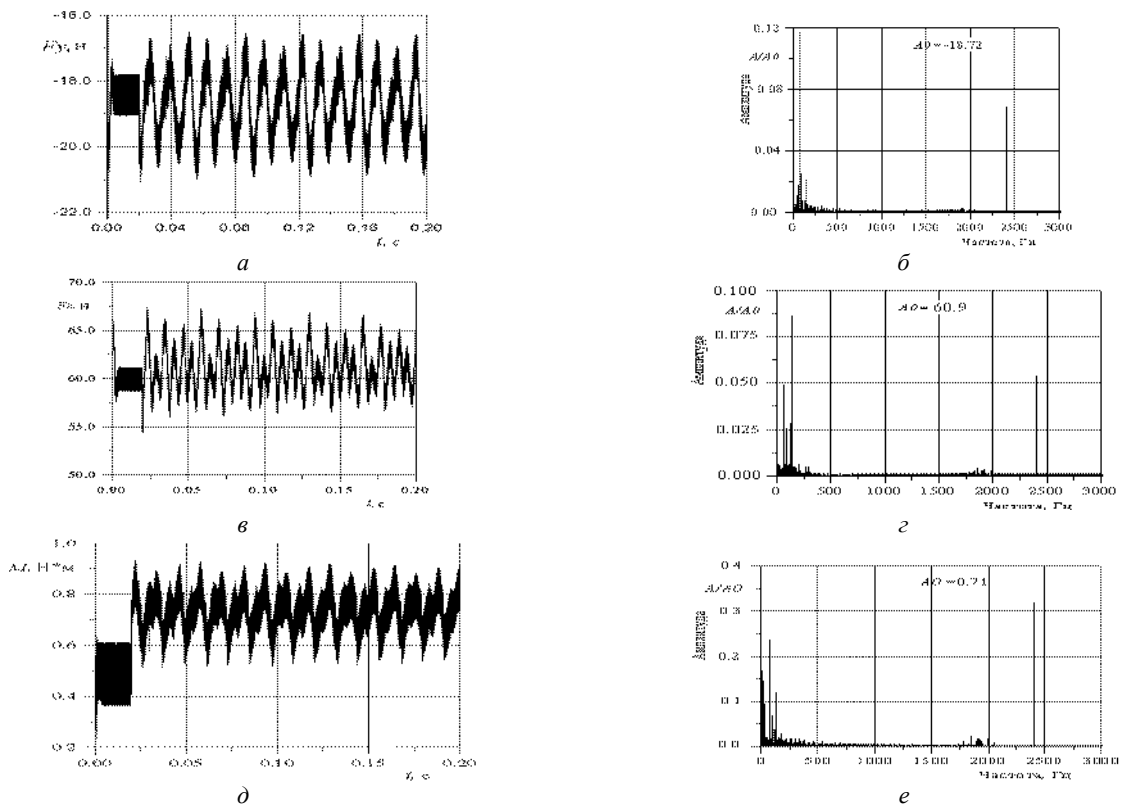


Рис. 4 – Аэродинамическая нагрузка в периферийном слое рабочей лопатки:
 а-б – окружная сила; в-г – осевая сила; д-е – аэродинамический момент

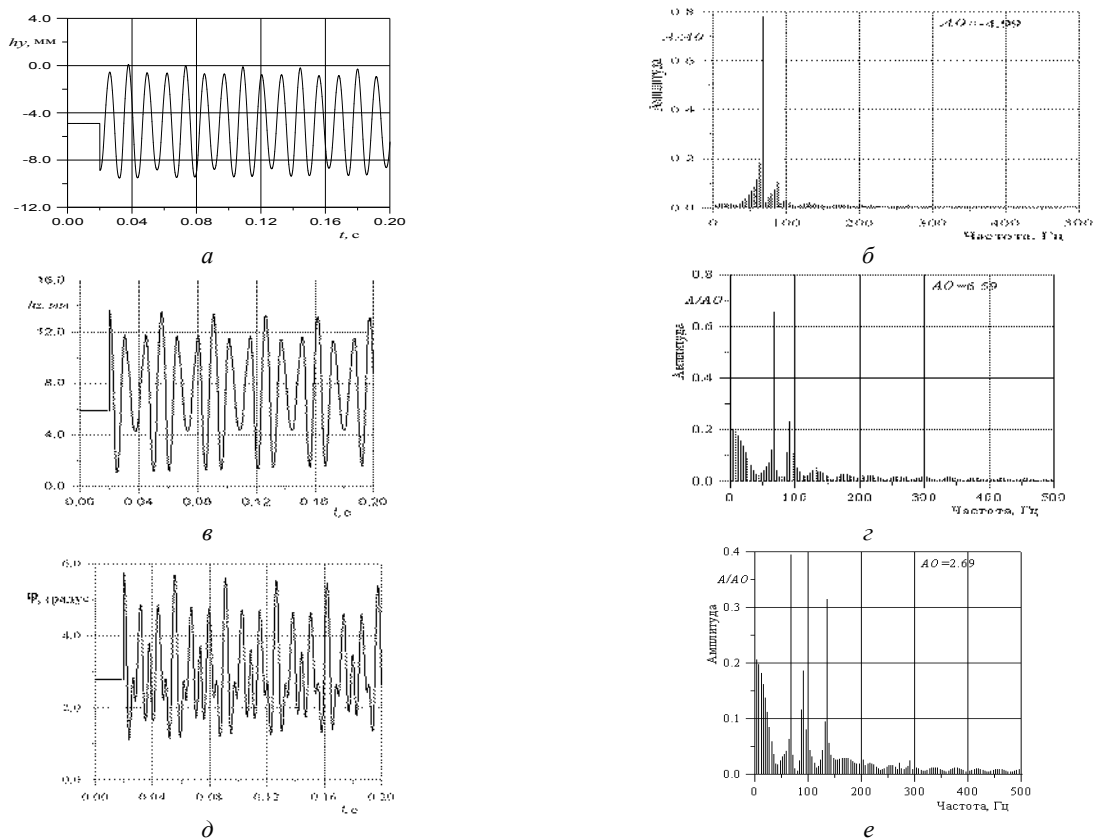


Рис. 5 – Колебания периферийного сечения рабочей лопатки:
 а-б – в окружном направлении; в-г – в осевом направлении; д-е – угол поворота

Как видно из графиков (рис. 5, б, з, е), основной вклад в колебания лопаток вносят гармоники с частотой 50 Гц, вызванные неравномерностью потока в окружном направлении и автоколебания с частотой близкой частоте 1-й собственной формы (~ 100 Гц).

Следует обратить внимание, что вынужденные колебания с частотами 2400 Гц являются пренебрежимо малыми.

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 турбомашинках / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Аэродинамика и Аэроакустика. Проблемы и перспективы. Сб. научных трудов. – Х. : ХАИ, 2009. – № 3. – С. 53–62. 2. Cinnella P. A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity / P. Cinnella, De Palma, G. Pascazio [et al] // Journal of Turbomachinery. – 2004. – Vol. 126. – P. 310–316. 3. Bolcs A. Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / 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 / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya // J. Problems in Mash. – Eng., 1999. – 1, № 2. – P. 65–76. 5. Гнесин В. И. Аэроупругое поведение последней ступени турбомашинки на номинальном и частичном режимах / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Пробл. машиностроения. – 2003. – 6, № 1. – С. 48–57. 6. 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. – № 19. – P. 1141–1153. 7. Гнесин В. И. Численный анализ влияния соотношения чисел лопаток статора и ротора на нестационарные нагрузки и режимы колебаний лопаток / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2009. – № 3. – С. 23–32. 8. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов [и др]. – М. : Наука, 1976. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gnesin, V. I., and L. V. Kolodyazhnaya. "Ajerouprugie javlenija v turbomashinah." *Ajerodinamika i Ajerookustika. Problemy i perspektivy. Sb. nauchnyh trudov.* Kharkov : Khai, 2009. No. 3. 53–62. Print. 2. Cinnella, P., et al. "A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity." *Journal of Turbomachinery.* Vol. 126. 2004. 310–316. Print. 3. Bolcs, A., and T. H. Fransson. "Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results." *Communication du LTAT.* EPFL Switzerland, 1986. No. 13. 174. Print. 4. Gnesin, V. I., and L. V. Kolodyazhnaya. "Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow." *Journal Problems in Mash. Eng.,* 1999. No. 1.2. 65–76. Print. 5. Gnesin, V. I., and L. V. Kolodyazhnaya. "Ajerouprugoe povedenie poslednej stupeni turbomashiny na nominal'nom i chastichnom rezhimah." *Probl. mashinostroenija.* No. 6.1. 2003. 48–57. Print. 6. Gnesin, V. I., L. V. Kolodyazhnaya and R. Rzadkowski. "A numerical modelling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades." *Journal of Fluid and Structure.* No. 19. 2004. 1141–1153. Print. 7. Gnesin, V. I., and L. V. Kolodyazhnaya. "Chislennyj analiz vlijanija sootnoshenija chisel lopatok statora i rotora na nestacionarnye nagruzki i rezhimy kolebanij lopatok." *Vestnik NTU «KhPI». Ser. : Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie.* No. 3. 2009. 23–32. Print. 8. Godunov, S. K., et al. *Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki.* Moscow : Nauka, 1976.

Поступила (received) 28.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гнесин Виталий Исаевич – доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом нестационарної газодинаміки і аероупругості, Інститут проблем машиностроення ім. А. Н. Подгорного НАН України, г. Харків; тел.: (050) 325-52-06; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua.

Gnesin Vitaly Isaevich – Doctor of Technical Sciences (DrSc), Full Professor, Head of Department of Unsteady Gasodynamics and Aeroelasticity, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov; tel.: (050) 325-52-06; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua.

Колодяжная Любовь Владимировна – доктор технічних наук, ведучий научний співробітник відділа нестационарної газодинаміки і аероупругості, Інститут проблем машиностроення ім. А. Н. Подгорного НАН України, г. Харків; тел.: (050) 610-29-20; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua.

Kolodyazhnaya Lyubov Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences (DrSc), Senior researcher of Department of Unsteady Gasodynamics and Aeroelasticity, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov; tel.: (050) 610-29-20; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua.

Жандковски Ромуальд – доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом динаміки і аероупругості турбомашин, Інститут проточних машин ПАН, Польща, г. Гданськ; e-mail: z3@imp.gda.pl.

Rzadkowski Romuald – Doctor of Technical Sciences (DrSc), Full Professor, Head of Department of dynamics and aeroelasticity of Turbomachines, Institute flow machines PAN, Poland, Gdansk; e-mail: z3@imp.gda.pl.