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 распределения за рабочим колесом 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 турбомашины 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 со декартовой системе координат [4, 5].

Учитывая непериодичность 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 $(k_1 : k_2 = z_{CT} : z_{pot})$. 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:

$$T = \frac{2\pi}{\left(z_{\rm CT} + z_{\rm pot}\right)} \cdot \left(k_1 + k_2\right)$$

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



Рис. 1 – Меридиональное сечение ступени турбомашины: *a* – статор; *б* – ротор

© В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски, 2015



Рис. 2 – Тангенциальное сечение ступени турбомашины: *a* – 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 $P_0 = 39400 \text{ Па}; T_0 = 348 \text{ K};$

 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. Гідравлічні машини та гідроагрегати



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, *a*, *s*, *d* 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*, *г*, *е*).

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

В данном расчете частота вращения ротора $v_{\text{pot}} = 50 \ \Gamma \mu \ (n = 3000 \ \text{мин}^{-1});$ 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 ($v_{pot} \times z_{CT} = 50 \times 48 = 2400$ Гц, где $z_{CT} - число$ 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 амплитудночастотные 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*, *г*, *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 турбомашинах / 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. - Р. 65-76. 5. Гнесин В. И. Аэроупругое поведение последней ступени турбомашины на номинальном и частичном режимах / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // Пробл. машиностроения. - 2003. - 6, № 1. - С. 48-57. 6. Gnesin V. I. А 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 c.

Bibliography (transliterated): 1. Gnesin, V. I., and L. V. Kolodjazhnaja. "Ajerouprugie javlenija v turbomashinah." Ajerodinamika i Ajeroakustika. 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. Kolodjazhnaja. "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. Kolodjazhnaja. "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. Kolodyazhnava 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. Kolodjazhnaja. "Chislennyj analiz vlijanija sootnoshenija chisel lopatok statora i rotora na nestacionarnye nagruzki i kolebanij lopatok." rezhimy 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 технических наук, профессор, заведующий отделом нестационарной газодинамики и аэроупругости, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; 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 технических наук, ведущий научный сотрудник отдела нестационарной газодинамики и аэроупругости, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; 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 технических наук, профессор, заведующий отделом динамики и аэроупругости турбомашин, Институт проточных машин ПАН, Польша, г. Гданьск; 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.