

УДК 621.165

**В.И. ГНЕСИН**, д-р техн. наук, проф., ИПМаш НАНУ, Харьков,  
**Л.В. КОЛОДЯЖНАЯ**, д-р техн. наук, с.н.с., ИПМаш НАНУ,  
Харьков,  
**Р. ЖАНДКОВСКИ**, д-р техн. наук, ИПМ ПАН, Гданьск,  
**А.А. КОЛЕСНИК**, асп., ИПМаш НАНУ, Харьков

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ОСЕВОЙ ТУРБОМАШИНЫ**

Представлен численный анализ аэроупругого поведения колеблющегося лопаточного венца осевой турбомашин в трехмерном трансзвуковом потоке идеального газа, основанный на решении связанной задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток. Проведенный численный анализ связанных колебаний лопаток подтвердил аэродемпфирование при взаимодействии первых шести собственных форм. Ил.: 7. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** аэроупругое поведение, лопаточный венец, идеальный газ, колебания лопаток.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Одной из важнейших проблем при создании или модернизации современных турбомашин является проблема надежности и безопасности.

Для того чтобы выполнить важнейшие требования надежности и безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей, необходимо прогнозировать аэроупругое состояние лопаточных аппаратов [1], как можно раньше и точнее.

В последнее время развиваются новые подходы, основанные на маршевой по времени схеме, включающей интегрирование уравнений аэродинамики и динамики упругих колебаний. Эти методы привлекают корректностью постановки связанной задачи аэроупругости, учитывающей взаимное влияние колебаний лопаток и нестационарных аэродинамических нагрузок [2 – 6]. Конструктору необходимо прогнозировать спектр колебаний лопаток, чтобы избежать их разрушения. Режим колебаний определяется соотношением возмущающих сил и сил механического демпфирования и аэродемпфирования.

Если при колебаниях лопаток энергия основного потока подводится к лопаткам, происходит рост самовозбуждающихся колебаний (флаттер). Для постановки задачи аэроупругости турбинной ступени используется частично-интегральный метод, который включает последовательное интегрирование уравнений аэродинамики и упругих колебаний

---

© В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная, Р.-Жандковски, А.А. Колесник, 2014

лопаток отдельно, но при этом решение, полученное в каждой из физических сред, используется в качестве граничного условия для другой среды на следующей итерации [7]. Однако этот метод имеет определенные недостатки.

**Цель статьи.** На основе аэродинамической модели [2], и модального подхода к решению задачи динамики лопаток [3, 4] разработать метод решения связанной задачи и выполнить численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца в трансзвуковом потоке газа.

**Аэроупругая модель.** Рассматривается обтекание трехмерным потоком идеального газа вращающегося лопаточного венца с лопатками, колеблющимися по собственным формам при заданных законах гармонических колебаний и межлопаточном угле сдвига по фазе колебаний лопаток (МЛФУ).

В качестве объекта исследования рассмотрен лопаточный венец осевой турбины, который представляет собой кольцевую решетку [8].

Трехмерный трансзвуковой поток невязкого нетеплопроводного газа через венец осевой турбомашин рассматривается в физической области, включающей рабочее колесо (РК) турбины, вращающееся с постоянной угловой скоростью, и описывается полной системой нестационарных уравнений Эйлера, представленных в интегральной форме законов сохранения [2].

Для численного интегрирования исходных уравнений используется явная конечно-объемная разностная схема Годунова-Колгана со 2-м порядком аппроксимации [2, 7], обобщенная на случай произвольной пространственной деформируемой разностной сетки.

Разностная сетка разбивается на сегменты, каждый из которых включает одну лопатку и имеет протяженность в окружном направлении, равную шагу статора или ротора. В свою очередь, каждый из сегментов дискретизируется с использованием  $H$ -сетки для статорных каналов или гибридной  $H$ - $H$ -сетки для каналов ротора. При этом внешняя  $H$ -сетка остается неподвижной в течение всего расчета, а внутренняя  $H$ -сетка перестраивается на каждой итерации по заданному алгоритму так, что ее внешние узлы остаются неподвижными, а внутренние жестко связаны с колеблющейся лопаткой.

На рис. 1, 2 приведены фрагменты разностной сетки – меридиональное сечение (рис. 1) и тангенциальное сечение в среднем слое (рис. 2). Количество тангенциальных сеточных сечений – 31. Количество узлов в каждом тангенциальном сечении в направлении оси  $y$  – 41, в направлении оси  $z$  – 65. Таким образом, количество сеточных узлов в каждом межлопаточном канале равно  $31 \times 41 \times 65 = 82615$ .

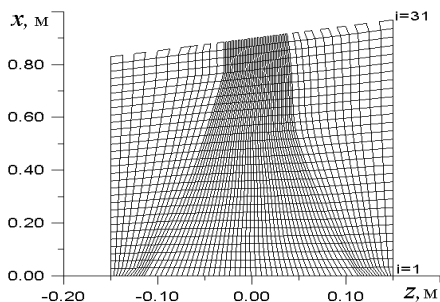


Рис. 1. Разностная сетка в меридиональной плоскости

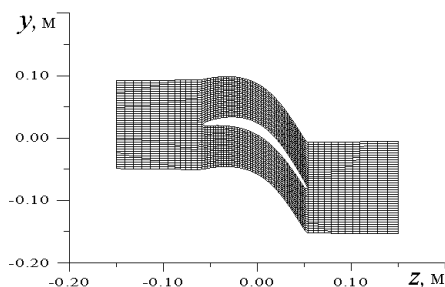


Рис. 2. Разностная сетка в среднем сечении

Динамическая модель колеблющейся лопатки в линейной постановке с использованием модального подхода [6], сводится к системе независимых дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных форм

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \lambda_i(t). \quad (1)$$

Здесь  $h_i$  – коэффициент механического демпфирования  $i$ -й моды;  $\omega_i$  – собственная частота  $i$ -й формы;  $\lambda_i$  – модальная сила, соответствующая перемещению по  $i$ -й форме, которая рассчитывается на каждой итерации по мгновенному распределению давления на поверхности лопатки

$$\lambda_i = \frac{\iint p \bar{U}_i \cdot \bar{n}^\circ d\sigma}{\iiint_V \rho \bar{U}_i^2 dv},$$

где  $p$  – давление на поверхности лопатки,  $U_i$  – вектор перемещения лопатки по  $i$ -й моде.

Модальную силу  $\lambda_i$  можно интерпретировать как обобщенную силу, действующую на лопатку при ее перемещении по  $i$ -й форме и отнесенную к единице массы.

Определив модальные коэффициенты  $i$ -й моды  $q_i$  из системы дифференциальных уравнений (1), получим перемещение и скорость лопатки в виде:

$$u(x, t) = \sum_i U_i(x) q_i(t),$$

$$\dot{u}(x, t) = \sum_i U_i(x) \dot{q}_i(t).$$

Решение связанной задачи заключается в параллельном решении на каждом шаге по времени аэродинамической и динамической задач с обменом результатов расчета каждой из задач на предыдущей итерации в качестве исходных данных на последующей итерации.

**Численный анализ.** Численные расчеты выполнены для лопаточного венца осевой турбины, вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega = 50$  Гц. Венец представляет собой кольцевую решетку, состоящую из 53 рабочих лопаток.

На первом этапе проведены расчеты аэродинамических характеристик турбинных лопаток для стационарного режима.

Значения газодинамических параметров на входе и выходе:

– полное давление  $P_0 = 29400 \div 37800$  Па (рис. 3);

– температура заторможенного потока  $T_0 = 348$  К;

– углы потока в окружном и радиальном направлениях (в абсолютной системе координат);

– статическое давление за рабочим венцом  $p_2 = 10400$  Па (рис. 3).

Аэродинамический расчет ведется до установления периодической нестационарности потока с частотой, равной частоте колебаний лопаток.

Изменение полного давления по высоте лопатки  $\bar{L}$  во вращающейся системе координат  $P_{0w}$  при заданном числе оборотов  $n = 3000$  об/мин приведено на рис. 3.

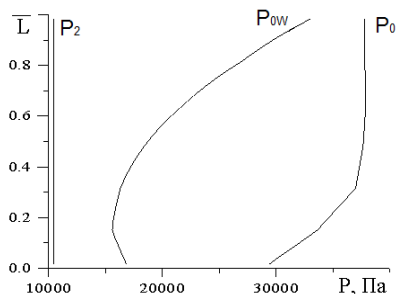


Рис. 3. Распределение по высоте лопатки полного давления в абсолютной системе, полного давления во вращающейся системе координат и статического противодействия

На рис. 4 приведены график изменения окружной силы, действующей на периферийный слой для МЛФУ = +90° с учетом 1 – 6 собственных форм колебаний.

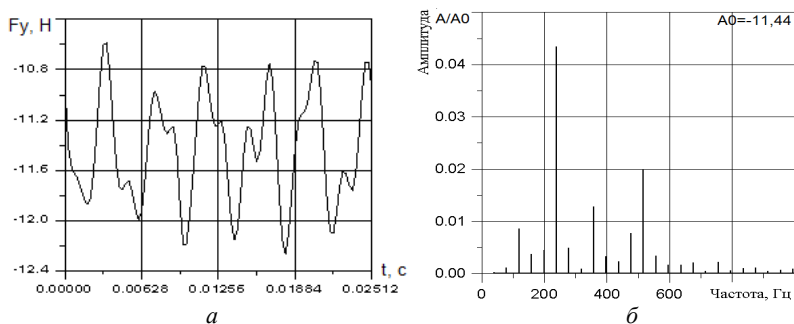


Рис. 4. Изменение аэродинамической силы, действующей на рабочую лопатку венца турбины (МЛФУ=+90 град):  $a$  – окружная сила;  $b$  – амплитудно-частотная характеристика

Аэроупругая устойчивость системы "поток газа – лопаточный венец" без учета механического демпфирования определяется аэродинамическим коэффициентом демпфирования  $D$ , равным взятому

со знаком "минус" коэффициенту работы  $W$ , совершаемой аэродинамическими силами за период колебаний:

$$W = \int_0^{\frac{1}{\nu}} \vec{F} \cdot \vec{v} dt, \quad D = - \frac{W}{(p_0 - p_1) \pi c h_0^2}, \quad (2)$$

где  $\vec{F}$  – вектор аэродинамической силы;  $\vec{v}$  – вектор скорости лопатки;  $c$  – хорда профиля;  $h_0$  – амплитуда изгибных колебаний.

Проведен анализ коэффициентов аэродемпфирования лопаточного венца при заданных гармонических колебаниях лопаток с учетом 6-ти собственных форм при различных углах сдвига по фазе колебаний лопаток. Собственные частоты приведены в таблице.

Таблица

Собственные частоты

Номер формы	1	2	3	4	5	6
$\nu$ , Гц	119.43	159.24	238.85	358.3	477.7	517.5

На рис. 5 показано влияние межлопаточного угла сдвига фаз колебаний лопаток на коэффициент аэродемпфирования с учетом 1 – 6 собственных форм колебаний. Результаты расчетов показали устойчивое аэродемпфирование для всех форм колебаний.

Как видно из графика, зависимость коэффициента аэродемпфирования от угла сдвига фаз имеет характерную синусоидальную форму. Максимальное аэродемпфирование имеет место для МЛФУ = +45 град, – 90 град, минимальное аэродемпфирование – для МЛФУ = +90 град, – 45 град.

Знак коэффициента аэродемпфирования, рассчитанный при заданных кинематических колебаниях лопаток, может рассматриваться лишь как необходимое условие, но не достаточное для возникновения самовозбуждающихся колебаний. Окончательную оценку аэроупругого поведения лопаточного венца можно получить лишь при решении связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний.

Ниже представлен численный анализ нестационарных аэродинамических нагрузок и амплитуд колебаний лопаток для МЛФУ = +90 град. с учетом взаимного влияния аэродинамических сил и упругих колебаний лопаток.

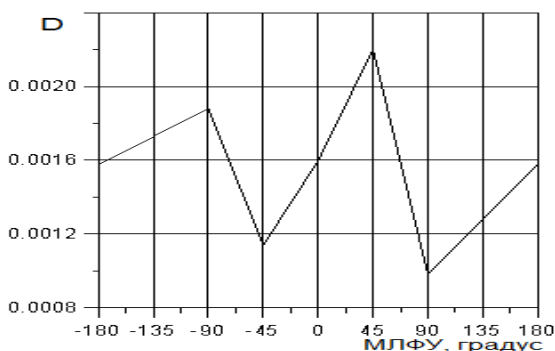


Рис. 5. Зависимость осредненного по высоте лопатки коэффициента аэродемпфирования от МЛФУ для 1 – 6 собственных форм колебаний

На рис. 6 приведены графики изменения аэродинамических нагрузок, действующих в периферийном слое рабочей лопатки.

На рис. 7 показано перемещение периферийного сечения лопаточного венца в окружном направлении и амплитудно-частотный спектр при межлопаточном угле сдвига колебаний лопаток, равном +90 градусов.

Основной вклад в изгибные колебания вносит гармоника с частотой близкой к частоте 1-й собственной формы колебаний. Данный режим характеризуется затуханием колебаний (аэродемпфированием).

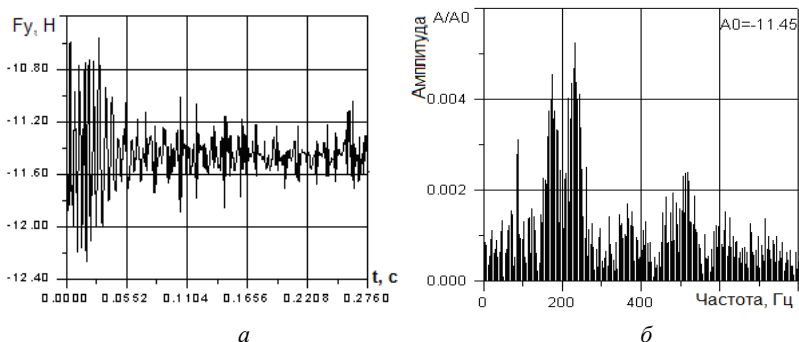


Рис. 6. Изменение аэродинамической силы, действующей на рабочую лопатку венца турбины (МЛФУ=+90 град): а, б – окружная сила и амплитудно-частотная характеристика

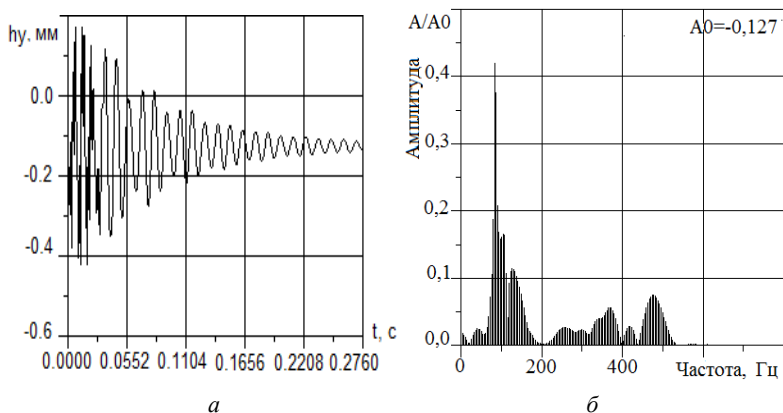


Рис. 7. Перемещение периферийного сечения лопаточного венца (МЛФУ = +90°):  
 а – в окружном направлении; б – амплитудно-частотный спектр

**Выводы.** Проведен численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца осевой турбины с использованием математической модели связанной задачи нестационарной аэродинамики и динамики упругих колебаний. При гармонических колебаниях лопаток по заданному закону с учетом взаимодействия всех шести форм имеет место "положительное" аэродемпфирование, т.е. отвод энергии от колеблющейся лопатки в основной поток. Численный анализ связанных колебаний подтвердил аэродемпфирование при взаимодействии первых шести собственных форм.

**Список литературы:** 1. Гнесин В.И. Аэроупругие явления в турбомашинах / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // Аэрогидродинамика и Аэроакустика: Проблемы и перспективы. Сборник научных трудов ХАИ, 2009. – № 3. – С. 53-62. 2. He L. Integration of 2D Fluid - Structure Coupled Systems for Calculation of Turbomachinery Aerodynamic, Aeroelastic Instabilities / L. He // J. of Comp. Fluid Dynamics. – 1994. – P. 217-231. 3. Гнесин В.И. Численный анализ аэроупругих характеристик турбинной ступени в трехмерном потоке вязкого газа / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // Вестник НТУ ХПИ. Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2008. – № 6. – С. 13-22. 4. Bolcs A. Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / A. Bolcs and T.H. Fransson // Communication du LTAT-EPFL, Switzerland. – 1986. – № 13. – 174 p. 5. Gallus H.E. Three-dimensional unsteady flow in a single axial-flow turbine and compressor / H.E. Gallus, C.A. Poensgen, K.J. Zesch // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Symp. on UAATP, Sept., 15-19. – 1991. – Notre Dame University, IN, USA. – 1991. – P. 487-506. 6. Соколовский Г.А. Нестационарные и вязкие течения в турбомашинах / Г.А. Соколовский, В.И. Гнесин. – Киев: Наук. думка, 1986. – 260 с. 7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 8. Konig S. Experimental Investigation of the Clocking Effect in a 1.5 – Stage Axial Turbine – Part 1: Time Averaged Results / S. Konig, B. Stoffel, M.T. Schobeiri // ASME J. Turbomachines. – 2009. – 131. – P. 1-12.



**Bibliography (transliterated):** 1. *Gnesin V.I.* Ajerouprugie javlenija v turbomashinah / *V.I. Gnesin, L.V. Kolodjazhnaja* // Ajerogidrodinamika i Ajerookustika: Problemy i perspektivy. Sbornik nauchnyh trudov HAI, 2009. – № 3.– S. 53-62. 2. *He L.* Integration of 2D Fluid - Structure Coupled Systems for Calculation of Turbomachinery Aerodynamic, Aeroelastic Instabilities / *L. He* // *J. of Comp. Fluid Dynamics*. – 1994. – S. 217-231. 3. *Gnesin V.I.* Chislennyj analiz ajerouprugih karakteristik turbinnoj stupeni v trehmernom potoke vjazkogo gaza / *V.I. Gnesin, L.V. Kolodjazhnaja* // Vestnik NTU HPI. Serija: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie. – 2008.– № 6. – S. 13-22. 4. *Bolcs A.* Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / *A. Bolcs and T.H. Fransson* // Communication du LTAT-EPFL, Switzerland. – 1986. – № 13. – 174 p. 5. *Gallus H.E.* Three-dimensional unsteady flow in a single axial-flow turbine and compressor / *H.E. Gallus, C.A. Poensgen, K.J. Zesch* // Proc. of the 6th Intern. Symp. on UAATP, Sept., 15-19. – 1991. – Notre Dame University, IN, USA. – 1991. – S. 487-506. 6. *Sokolovskij G.A.* Nestacionarnye i vjazkie techenija v turbomashinah / *G.A. Sokolovskij, V.I. Gnesin*. – Kiev: Nauk. dumka, 1986. – 260 s. 7. Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki / *Pod red. S.K. Godunova*. – M.: Nauka, 1976. – 400 s. 8. *Konig S.* Experimental Investigation of the Clocking Effect in a 1.5 – Stage Axial Turbine – Part 1: Time Averaged Results / *S. Konig, B. Stoffel, M.T. Schobeiri* // ASME J. Turbomachines. – 2009. – 131. – P. 1-12.

Получена (received) 30.03.2014

*Статью представил д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов ИПМаш НАН Украины Боробьев Ю.С.*

Gnesin Vitaly, Dr.Sci.Tech, Professor  
Institute of Mechanical Engineering Problems  
of National Academy of Sciences of the Ukraine  
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046  
Tel.: (057) 94-18-67, e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua  
ORCID ID: 0000-0001-6411-6158

Kolodyazhnaya Lyubov, Dr.Sci.Tech, leading scientific worker  
Institute of Mechanical Engineering Problems  
of National Academy of Sciences of the Ukraine  
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046  
Tel.: (057) 94-18-67, e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua  
ORCID ID: 0000-0001-5469-4325

Rzadkowski Romuald, Dr.Sci.Tech, Professor  
The Szewalski Institute of Fluid-Flow Machinery  
Polish Academy of Sciences  
Str. Fiszerza, Gdańsk, Poland, 80-231  
Tel.: (+48) 58 3460 881, 58 3411 271, e-mail: z3@imp.gda.pl

Kolisnyk Oleksandr, Post Graduate Student  
Institute of Mechanical Engineering Problems  
of National Academy of Sciences of the Ukraine  
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046  
Tel.: (057) 349-47-78, e-mail: sasha\_24061988@mail.ru