

УДК 621.165

**Л. В. Колодяжная**, канд. техн. наукИнститут проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua)**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
НАГРУЗОК И УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК  
В СЕМИСТУПЕНЧАТОМ ОСЕВОМ КОМПРЕССОРЕ***Проведен численный анализ нестационарного взаимодействия лопаточных венцов семиступенчатого осевого компрессора в трехмерном потоке идеального газа. Показано, что основной вклад в нестационарные нагрузки вносят гармоники с частотами, которые равны произведению частоты вращения на числа лопаток соседних венцов.**Проведено чисельний аналіз нестационарної взаємодії лопатних вінців семиступінчатого осевого компресора у тривимірному потоці ідеального газу. Показано, що основний внесок в нестационарні навантаження вносять гармоніки з частотами, які дорівнюють добутку частоти обертання на числа лопаток сусідніх вінців.***Введение**

Проблема прогнозирования аэроупругого поведения лопаток (автоколебания, резонансные колебания, флаттер) приобретает особую важность при разработке высоконагруженных компрессорных и вентиляторных венцов, а также ступеней паровых и газовых турбин, работающих в нерасчетных условиях.

В настоящее время развиты новые подходы в исследовании аэроупругого поведения лопаточного венца турбомшины, основанные на одновременном интегрировании уравнения движения газа и колебаний лопаток [1–5].

Целью настоящей работы является численный анализ аэроупругих колебаний лопаточных венцов осевого компрессора в трехмерном потоке с учетом взаимодействия смежных ступеней.

**1. Постановка задачи**

Трехмерный трансзвуковой поток невязкого нетеплопроводного газа через отсек осевого компрессора рассматривается в физической области, включающей направляющий аппарат С0 и семь ступеней. Меридиональная проекция проточной части показана на рис. 1.

Расчетная область содержит пятнадцать подобластей. Каждая из них включает один лопаточный венец и имеет общие зоны пересечения в осевых зазорах.

В каждый момент времени структура потока характеризуется периодичностью на минимальном угловом шаге

$$T_{\text{мин}} = \frac{2\pi(k_{C0} + k_{P1} + k_{C1} + k_{P2} + k_{C2} + k_{P3} + k_{C3} + k_{P4} + k_{C4} + k_{P5} + k_{C5} + k_{P6} + k_{C6} + k_{P7} + k_{C7})}{(z_{C0} + z_{P1} + z_{C1} + z_{P2} + z_{C2} + z_{P3} + z_{C3} + z_{P4} + z_{C4} + z_{P5} + z_{C5} + z_{P6} + z_{C6} + z_{P7} + z_{C7})},$$

где  $z_{C0}$ ,  $z_{Pi}$ ,  $z_{Ci}$  – числа лопаток статорных и роторных венцов ( $i = 1 \div 7$ );  $k_{C0}$ ,  $k_{Pi}$ ,  $k_{Ci}$  – взаимно простые числа, пропорциональные числам лопаток. В каждой из подобластей геометрические и аэродинамические характеристики лопаточных венцов описываются в относительной или абсолютной системах координат, жестко связанных с вращающимся или неподвижным лопаточным венцом соответственно. В этом случае расчетная область содержит  $k_{C0} + k_{P1} + k_{C1} + k_{P2} + k_{C2} + k_{P3} + k_{C3} + k_{P4} + k_{C4} + k_{P5} + k_{C5} + k_{P6} + k_{C6} + k_{P7} + k_{C7}$  сегментов, каждый из которых включает одну лопатку и имеет протяженность в окружном направлении, равную шагу соответствующего лопаточного венца. Каждый из сегментов расчетной области дискретизируется с использованием гибридной Н–Н разностной сетки. Разностные сетки в тан-

генциальной плоскости для периферийных сечений ротора и статора 1-й и 7-й ступеней показаны на рис. 2.

Трехмерный трансзвуковой поток идеального газа описывается в относительной декартовой системе координат полной нестационарной системой уравнений Эйлера, представленной в интегральной форме законов сохранения массы, импульса и энергии [4]. Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик.

Дискретная форма уравнений Эйлера получена для произвольной пространственной деформируемой сетки с использованием разностной схемы Годунова–Колгана со 2-м порядком аппроксимации по координатам и времени [4].

Динамическая модель колеблющейся лопатки с использованием модального подхода приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных форм [4]. Перемещения и скорость лопатки, полученные из решения динамической задачи, на каждой итерации используются в качестве граничных условий в аэродинамической задаче.

## 2. Численные исследования

Численное исследование выполнено для осевого компрессора, включающего направляющий аппарат и семь ступеней при номинальном режиме работы:

- число оборотов ротора  $n = 15360$  об/мин;
- полное давление в абсолютной системе координат на входе в компрессор  $p_0 = 101000$  Па;
- полная температура в абсолютной системе координат на входе  $T_0 = 288$  К;
- углы потока на входе в радиальном и окружном направлениях заданы;
- статическое давление на выходе за 7-м статором  $p_2 = 380000$  Па.

Числа лопаток статорных и роторных венцов:  $z_{C0} = 42$ ,  $z_{P1} = 28$ ,  $z_{C1} = 35$ ,  $z_{P2} = 42$ ,  $z_{C2} = 42$ ,  $z_{P3} = 42$ ,  $z_{C3} = 56$ ,  $z_{P4} = 42$ ,  $z_{C4} = 56$ ,  $z_{P5} = 56$ ,  $z_{C5} = 56$ ,  $z_{P6} = 56$ ,  $z_{C6} = 42$ ,  $z_{P7} = 56$ ,  $z_{C7} = 56$ . Таким образом, разностная сетка содержит  $k_{C0} + k_{P1} + k_{C1} + k_{P2} + k_{C2} + k_{P3} + k_{C3} + k_{P4} + k_{C4} + k_{P5} + k_{C5} + k_{P6} + k_{C6} + k_{P7} + k_{C7} = 6 + 4 + 5 + 6 + 6 + 6 + 8 + 6 + 8 + 8 + 8 + 8 + 6 + 8 + 8 = 101$  сегмент, а угловая протяженность зоны периодичности (расчетной области)  $T = 2\pi/7$ .

Колебания рабочих лопаток определялись с учетом первых пяти собственных форм, собственные частоты приведены ниже.

Номер моды	1	2	3	4	5
v, Гц ротор1	540	1620	2160	3240	4320
v, Гц ротор2	670	2010	2680	4020	6030
v, Гц ротор3	1200	3600	4800	7200	8400
v, Гц ротор4	1150	3450	4600	8050	9200
v, Гц ротор5	1380	4140	5520	9660	11040
v, Гц ротор6	1600	4800	7180	11150	12740
v, Гц ротор7	1600	4800	7960	11940	13540

Выполнен расчет трехмерного нестационарного потока через компрессор без учета колебаний лопаток в течение одного оборота ротора и с учетом колебаний лопаток под действием мгновенных аэродинамических нагрузок в течение восьми оборотов ротора.

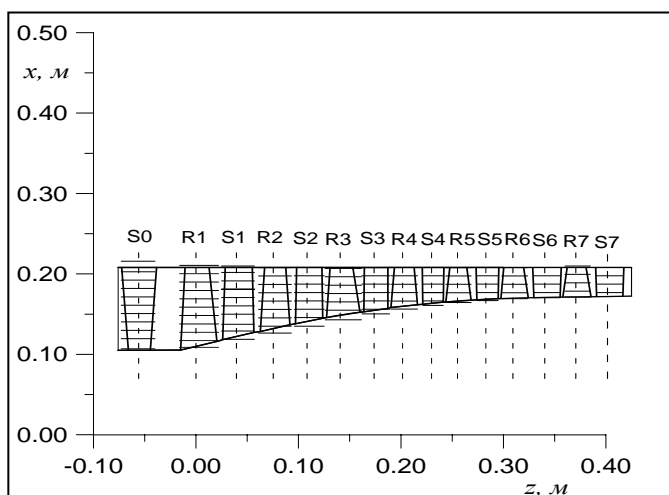
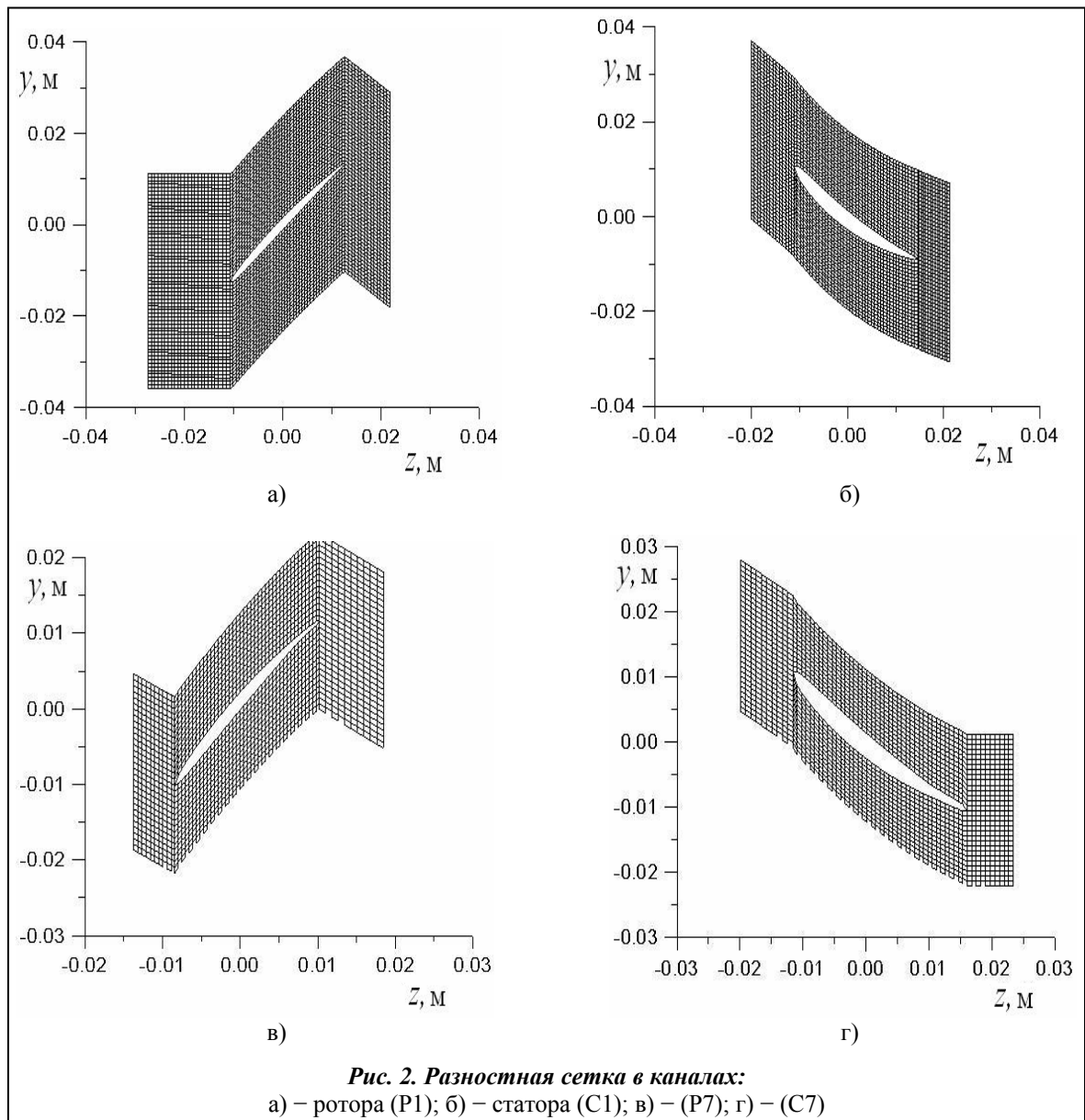


Рис. 1. Меридиональная проекция осевого компрессора



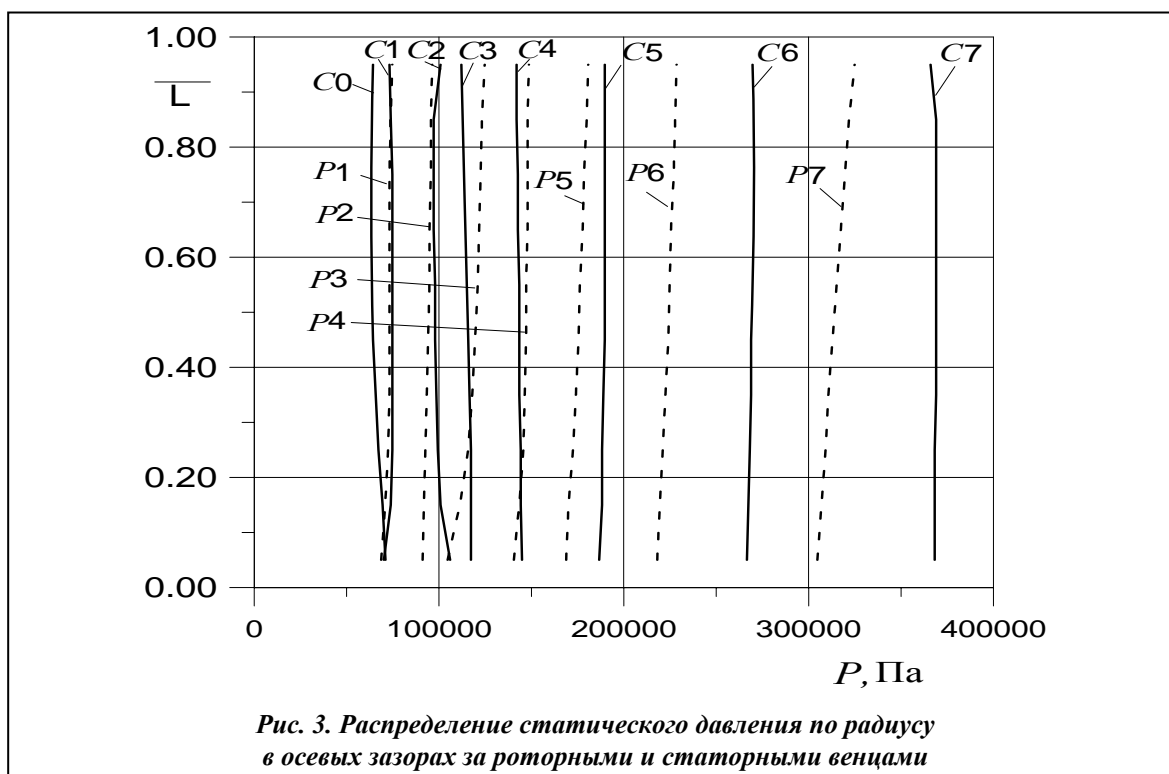
На рис. 3 представлены графики осредненных по времени распределений статического давления по радиусу в осевых зазорах за роторными венцами (штриховые линии) и за статорными (сплошные линии).

Ниже представлены результаты численного исследования нестационарных аэродинамических нагрузок, действующих на рабочие лопатки, и колебаний лопаток для режима, характеризующегося массовым расходом 17,4 кг/с и степенью повышения давления  $\pi_k = 5,9$ .

Анализ нестационарных характеристик проведен с использованием разложения в ряды Фурье

$$F(t) = F_0 + \sum_{i=1}^{\infty} F_{1i} \cdot \cos(2\pi \nu i t) + F_{2i} \sin(2\pi \nu i t),$$

где  $F(t)$  – физическая нестационарная характеристика;  $F_0$  – среднее значение;  $F_{1i}$  и  $F_{2i}$  – коэффициенты Фурье;  $i$  – номер гармоники;  $\nu$  – 1-я гармоническая частота.



**Рис. 3. Распределение статического давления по радиусу в осевых зазорах за роторными и статорными венцами**

Частота вращения ротора  $\nu_{\text{рот}} = 256$  Гц; время одного оборота ротора  $t = 0,0039$  с; время расчета соответствует времени поворота ротора на 8 оборотов, первая гармоническая частота  $\nu = \nu_{\text{рот}}/8 = 32$  Гц.

На рис. 4, 5 приведены графики нестационарных аэродинамических нагрузок (окружная сила  $F_u$ , осевая сила  $F_z$ , аэродинамический момент  $M$  относительно центра тяжести), действующих в периферийных слоях рабочих лопаток 1-го и 7-го роторных венцов, и их амплитудно-частотные спектры.

Как видно из графиков, нестационарные аэродинамические нагрузки включают высокочастотные гармоники с частотами, кратными частотам следования  $\nu_{\text{рот}} \cdot z_{\text{стат}}$ , которые соответствуют соседним статорным венцам (для лопаток 1-го лопаточного венца 10752 и 8960 Гц, для лопаток 7-го венца 14336 Гц).

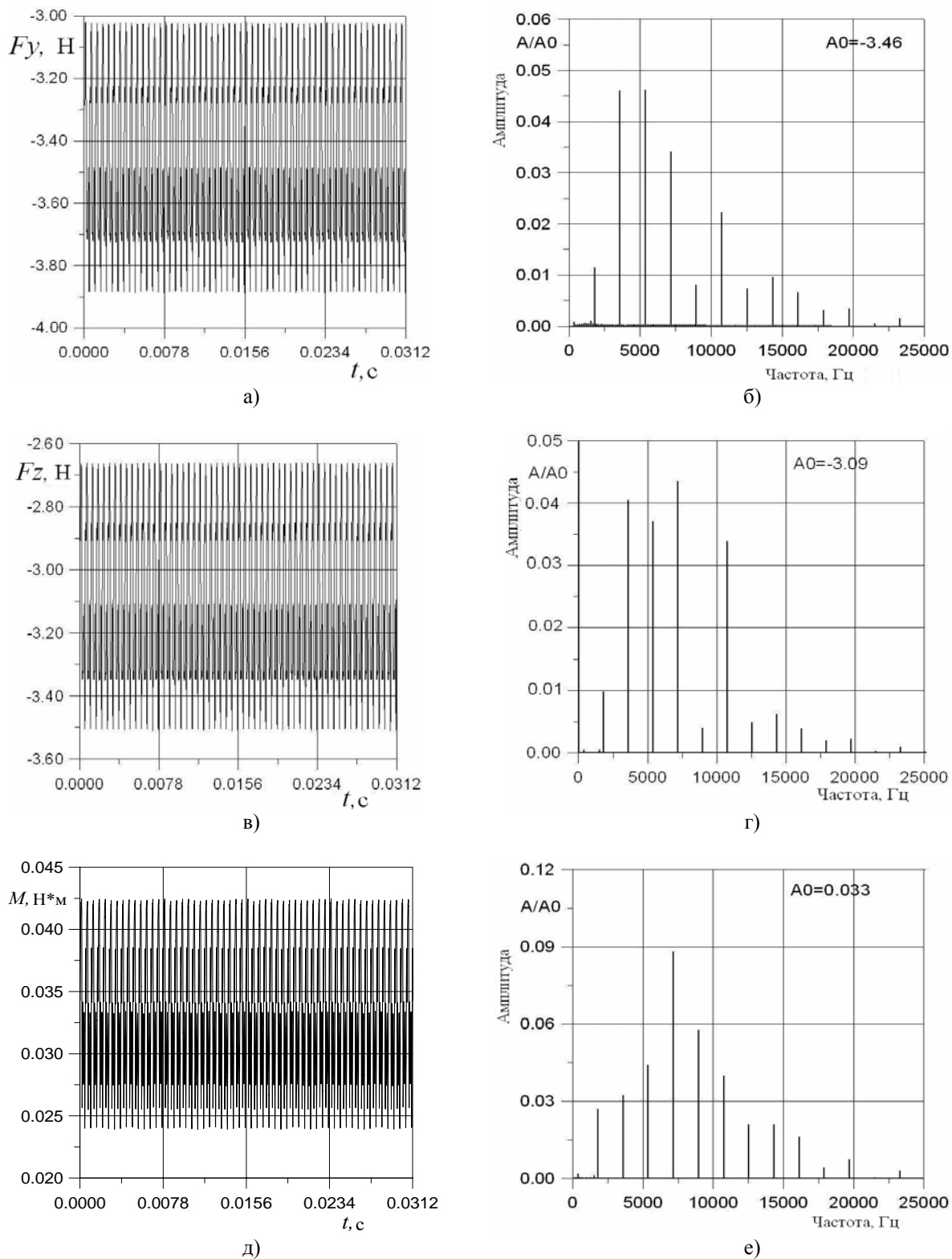
Наряду с высокочастотными возмущениями нестационарные нагрузки включают гармоники с частотами, кратными частоте следования зоны периодичности (3584, 5376, 7168 Гц), и низкочастотные гармоники, вызванные колебаниями лопаток.

Колебания лопаток под действием переменных аэродинамических сил представлены в форме перемещений периферийных сечений рабочих лопаток 1-го и 7-го лопаточных венцов. На рис. 6, 7 приведены графики перемещений периферийных сечений в окружном направлении ( $h_y$ ), осевом ( $h_z$ ) и угол поворота вокруг центра тяжести ( $\varphi$ ).

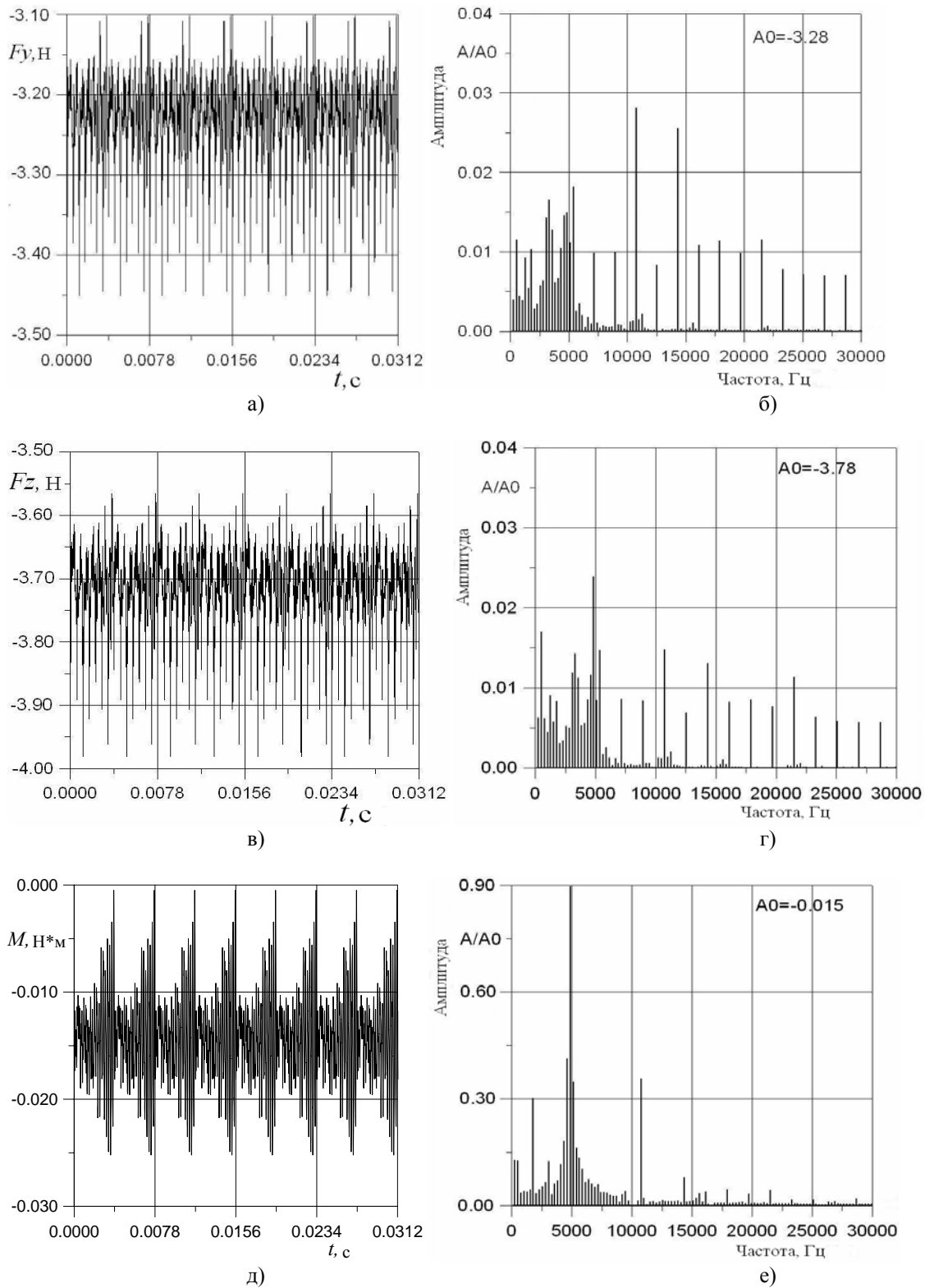
Из графиков видно, что рабочие лопатки 1-го лопаточного венца совершают устойчивые изгибные автоколебания (рис. 6, а, в) с частотой, близкой к собственной частоте 1-й моды ( $\sim 500$  Гц) и крутильные автоколебания (рис. 6, д) с частотами 1-й и 3-й мод ( $\sim 500$  Гц, 1900 Гц). Низкочастотные колебания рабочих лопаток 7-го венца характеризуются аэро-

демпфированием, причем логарифмический декремент затухания колебаний  $\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_n}$  ( $n$  — число циклов колебаний;  $A_1$  и  $A_n$  — амплитуды 1-го и  $n$ -го циклов) возрастает с увеличением жесткости лопатки и составляет 0,034 для лопаток 7-го венца.

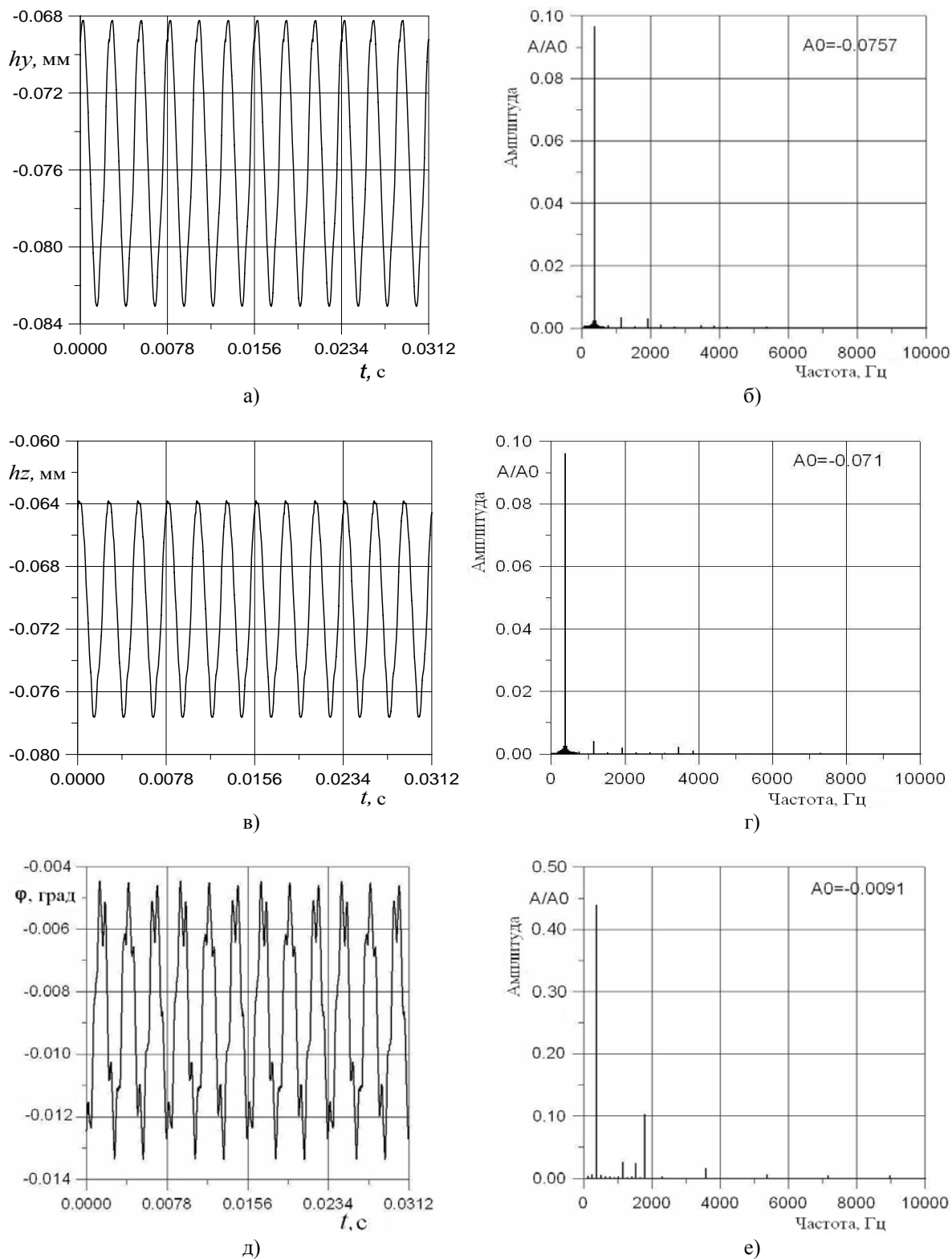
Следует отметить, что амплитуды вынужденных колебаний с высокими частотами пренебрежимо малы по сравнению с амплитудами автоколебаний.



**Рис. 4. Изменение нестационарной силы, действующей на периферийный слой рабочей лопатки 1-го лопаточного венца:**  
 а) – окружная сила; в) – осевая сила; д) – момент относительно центра тяжести;  
 б), г), е) – амплитудно-частотный спектр

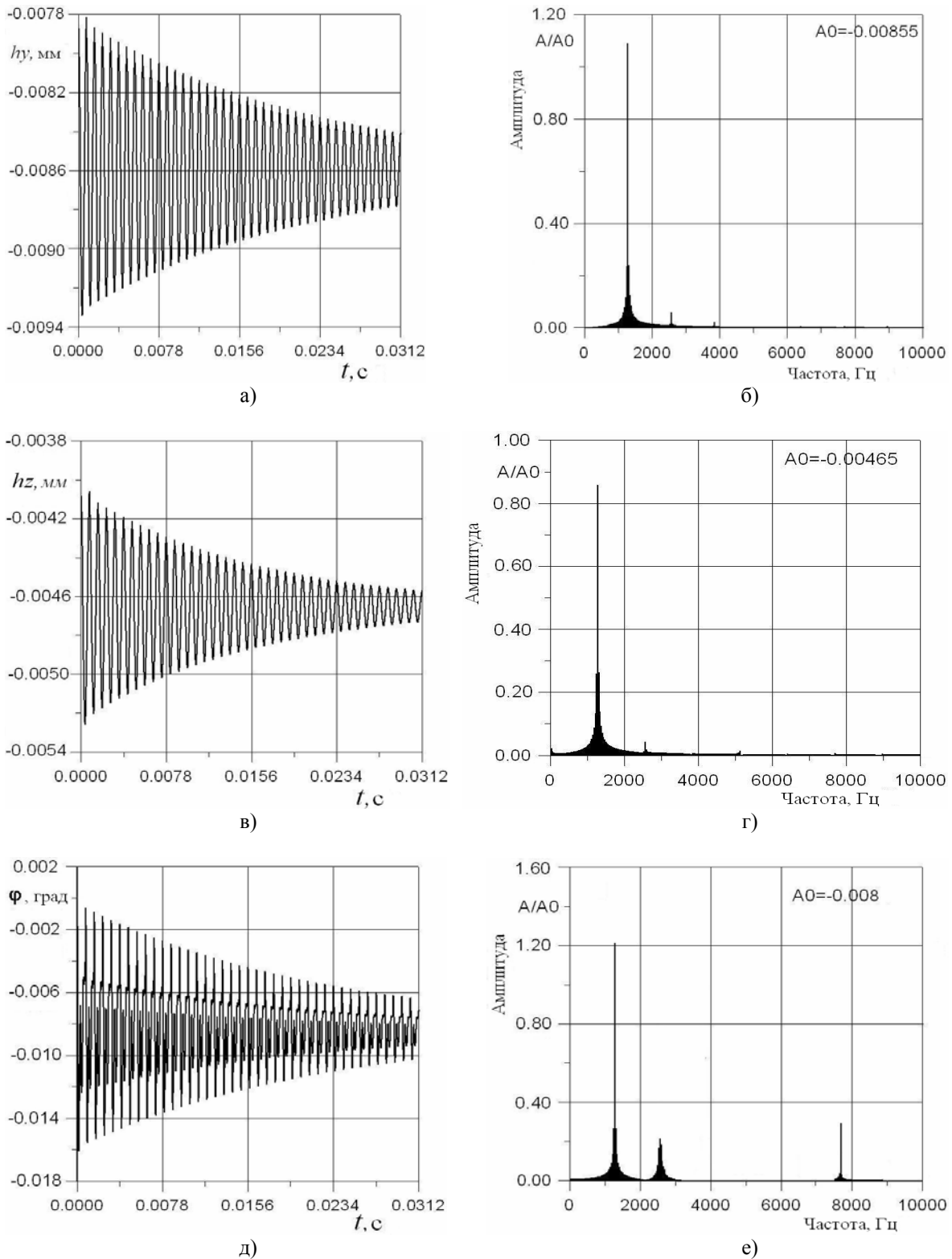


**Рис. 5. Изменение нестационарной силы, действующей на периферийный слой рабочей лопатки 7-го лопаточного венца:**  
 а) – окружная сила; в) – осевая сила; д) – момент относительно центра тяжести;  
 б), г), е) – амплитудно-частотный спектр



**Рис. 6. Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки 1-го лопаточного венца:**

а) – в окружном направлении; в) – в осевом направлении;  
 д) – угол поворота вокруг центра тяжести; б), г), е) – амплитудно-частотный спектр



**Рис. 7. Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки 7-го лопаточного венца:**

а) – в окружном направлении; в) – в осевом направлении;  
 д) – угол поворота вокруг центра тяжести; б), г), е) – амплитудно-частотный спектр



**Выводы**

Проведены численные исследования аэроупругого поведения лопаточных венцов осевого компрессора с учетом их взаимного аэродинамического взаимодействия.

Показано влияние смежных венцов на нестационарные аэродинамические нагрузки и режимы колебаний лопаток.

Колебания лопаток ротора по всем формам являются устойчивыми.

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

**Литература**

1. *Moyroud F.* A Modal Coupling for Fluid and Structure Analysis of Turbomachine Flutter. Application to a Fan Stage / F. Moyroud, G. Jacquet-Richardet, T. H. Fransson // ASME Paper 96-GT-335. – 1996. – P. 1–19.
2. *Part-speed flutter analysis of a wide-chord fan blade* / J. W. Chew, J. G. Marshall, M. Vandati, M. Imregun // *Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines*. Kluwer Academic Publishers. In: Fransson T.H. (Ed.), Dordrecht. – 1998. – P. 707–724.
3. *Gnesin V. I.* A coupled fluid-structure analysis for 3-D flutter in turbomachines / V. I. Gnesin, R. Rzadkowski, L. Kolodyazhnaya // ASME J. 2000- GT-380, Intern. Gas Turbine and Aeroengine Congr., Munich, Germany. – 2000. – P. 8.
4. *Gnesin V. I.* A numerical modeling of stator-rotor interaction in turbine stage with oscillating blades / V. I. Gnesin, R. Rzadkowski, L. Kolodyazhnaya // *J. Fluid and Structure*. – 2004. – 19. – P. 1141–1153.
5. *Гнесин В. И.* Численное исследование аэроупругого поведения компрессорной ступени в трехмерном потоке вязкого газа / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // *Вестн. НТУ ХПИ. Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование*. – 2010. – № 2. – С. 39–48.

Поступила в редакцию  
03.04.11

УДК 621.165:51.380

**И. Е. Аннопольская**, канд. техн. наук  
**А. С. Ковалев**, канд. техн. наук  
**А. В. Медведовский**

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: tepl07@ukr.net)

## **МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ РАСШИРЕНИИ ПОТОКА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

*Рассмотрены два способа расчета параметров состояния пара в метастабильной области. Первый подход основан на решении системы дифференциальных уравнений для двухмерного неравновесного расширения потока влажного пара. Данный метод позволяет рассчитывать стационарные и нестационарные потоки влажного пара, определять газодинамические параметры, влажность и переохлаждение в любой момент времени в любой точке расчетной области. Вторым, упрощенным способом расчета, основан на вычислении термодинамических свойств воды и водяного пара на базе Международной системы уравнений IAPWS-IF97 и IAPWS-95. Приведено сравнение результатов, полученных по этим методикам на тестовом примере.*

*Розглянуто два способи розрахунків параметрів стану пари в метастабільній області. Перший підхід ґрунтується на розв'язанні системи диференціальних рівнянь для двовимірного нерівноважного розширення потоку вологої пари. Даний метод дозволяє розраховувати стаціонарні і нестаціонарні потоки вологої пари, визначати газодинамічні*