

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

### **АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК И АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ С УЧЕТОМ РАССТРОЙКИ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ**

На основании разработанной математической модели и численного метода аэроупругого поведения лопаточного венца в транзвуковом потоке газа (связанная задача нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток) представлен численный анализ аэроупругого поведения турбинного лопаточного венца в трехмерном потоке идеального газа через ступень турбины с учетом расстройки собственных форм и частот лопаток. Данный метод решения связанной аэроупругой задачи позволит 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.

**Ключевые слова:** математическая модель, лопаточный венец, аэроупругое поведение, собственная форма, идеальный поток.

**В. І. ГНЕСІН, Л. В. КОЛОДЯЖНА, Р. ЖАНДКОВСКИ**

### **АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА АМПЛІТУД КОЛИВАНЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ОСТАНЬОГО СТУПЕНЯ ТУРБОМАШИНИ З УРАХУВАННЯМ РОЗЛАДУ ВЛАСНИХ ФОРМ**

На підставі розробленої математичної моделі та чисельного методу аероупругої поведінки лопаткового вінця в транзвуковому потоці газу (зв'язана задача нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток) представлено чисельний аналіз аероупругої поведінки турбінного лопаткового вінця у тривимірній течії ідеального газу через ступінь турбіни з урахуванням розладу власних форм і частот лопаток. Цей метод рішення зв'язаної аероупругої задачі дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток в тривимірному потоці газу, включаючи вимушені коливання, самозбуджуючі коливання і автоколивання з метою підвищення економічності і надійності лопаткових апаратів турбомашин.

**Ключові слова:** математична модель, лопатковий вінець, аероупруга поведінка, власна форма, ідеальна течія.

**V. GNESIN, L. KOLODYAZHNAYA, R. RZADKOWSKI**

### **ANALYSIS OF NONSTATIONARY LOADINGS AND VIBRATION AMPLITUDES OF THE BLADES OF THE LAST TURBINE CASCADE TAKING INTO CONSIDERATION THE DETUNING OF NATURAL MODES**

Nonstationary phenomena caused by the blade vibration under the action of disturbing forces that are characterized by the energy exchange between the gas flow and the vibrating blades and make the foundation for a physical mechanism of self-excited oscillations that can either damp (aerodamping) or develop in the stable mode of self-induced vibrations or in the unstable mode of flutter that can result in the construction failure. One of the approaches to an increase in the vibration stability of the blades is the detuning of natural modes and frequencies. Based on the developed mathematical model and the numerical method of aeroelastic behavior of the blade rim in the transonic gas flow (the coupled problem of nonstationary aerodynamics and elastic vibrations of the blades), we gave the numerical analysis of aeroelastic behavior of the turbine blade row in the three-dimensional flow of ideal gas through the turbine cascade taking into consideration the detuning of blade natural modes and frequencies. To solve the coupled problem we used the partially integral method that includes Euler integral equations and those of the dynamics of vibrating blades (modal approach) at each time step with the information exchange. This method of the solution of coupled aeroelastic problem enables the prediction of the amplitude-frequency spectrum of blade vibrations in the three dimensional flow of ideal gas, including forced vibrations, self-excited vibrations and self-induced vibrations in order to increase the efficiency and reliability of the blade rows of turbine machines. As a result of the investigation we obtained gas dynamic parameters in the form of nonstationary fields, nonstationary loads that have action on the blades and the amplitude and frequency spectra of blade vibrations.

**Key words:** mathematical model, blade row, aeroelastic behavior, natural mode and the ideal flow.

#### **Введение**

Тенденция развития газо- и паротурбинных двигателей с высокими аэродинамическими показателями и соответственно высоко нагруженными лопатками приводит к проблеме аэроупругого поведения лопаток не только в компрессорах, но и в последних ступенях паровых и газовых турбин. Нестационарные аэродинамические силы, действующие на лопатки компрессоров и турбин, могут вызвать чрезмерные вибрации лопаток, приводящие к разрушению конструкции. Поэтому аэроупругое поведение лопаток представляет важную проблему надежности и безопасности.

Аэроупругие явления – это явления взаимодействия инерционных, упругих и аэродинамических сил, действующих на конструкцию, обтекаемую потоком газа [1].

Нестационарные явления, вызванные колебаниями лопаток под действием возмущающих сил, характеризуются обменом энергией между потоком газа и колеблющимися лопатками и составляют основу физического механизма самовозбуждающихся колебаний, которые могут либо затухать (аэродемпфирование), либо проявляться в устойчивой форме автоколебаний, либо в неустойчивой форме флаттера, который может привести к разрушению конструкции.

© В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, Р. Жандковски, 2018

Одним из подходов к повышению устойчивости колебаний лопаток является расстройка собственных форм и частот.

В статье предусматривается моделирование аэроупругого поведения лопаточных венцов на основе разработанного численного метода и алгоритма решения связанной задачи аэродинамики нестационарного потока идеального газа и динамики колеблющихся лопаток с учетом расстройки собственных форм и частот. Данный 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 [2].

### Цель работы

Целью настоящей работы является численный анализ влияния расстройки собственных форм и частот рабочих лопаток на нестационарные нагрузки и амплитуды колебаний лопаточных аппаратов на основе разработанного метода расчета связанной задачи нестационарной газодинамики и упругих колебаний лопаток.

### Постановка задачи

Рассматривается обтекание трехмерным потоком идеального нетеплопроводного газа вращающегося венца осевой турбины с колеблющимися лопатками. Лопаточный венец турбины представляет собой кольцевую решетку, состоящую из 53 лопаток.

Трехмерный поток идеального газа через лопаточный венец рассматривается в физической области, включающей рабочее колесо, вращающееся с постоянной угловой скоростью, и описывается полной системой нестационарных уравнений Эйлера, представленных в интегральной форме законов сохранения [3]. Расчетная область включает полную дугу окружности (53 межлопаточных канала).

Разностная сетка разбивается на сегменты, каждый из которых включает одну лопатку и имеет протяженность в окружном направлении, равную шагу венца. Каждый из сегментов дискретизируется с использованием гибридной  $H-H$  разностной сетки [4].

Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик [3–4]. В качестве граничных условий принимаются:

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

Граничные условия дополняются соотношениями на характеристиках во входном и выходном сечениях расчетной области.

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 [5].

Динамическая модель колеблющейся лопатки описывается с использованием модального подхода [6].

Алгоритм решения аэроупругой связанной задачи основан на последовательном по времени интегрировании уравнений газодинамики и уравнений колебаний лопаток с обменом информацией на каждой итерации [6].

### Численный анализ

Численное исследование проведено для лопаточного венца последней ступени турбины мощностью 370 МВт с учетом расстройки рабочих лопаток в трехмерном потоке для двух вариантов.

В 1-ом и 2-ом вариантах приняты следующие граничные условия:

- число оборотов ротора  $n = 3000$  об/мин;
- полное давление в абсолютной системе координат на входе  $P_0 = 29400\text{--}37800$  Па;
- полная температура в абсолютной системе координат на входе  $T_0 = 348$  К;
- углы потока на входе в статор в тангенциальной ( $\alpha$ ) и меридиональной ( $\gamma$ ) плоскостях заданы;
- статическое давление на выходе за венцом  $P_2 = 10400$  Па.

Варианты 1 и 2 исследования аэроупругих характеристик лопаточного венца осевой турбомашин с учетом расстройки собственных форм и частот колебаний лопаток отличаются количеством узловых диаметров (УД).

Межлопаточный фазовый угол (МЛФУ) определяется количеством узловых диаметров

$$\text{МЛФУ} = 360^\circ \times \frac{\text{УД}}{z},$$

где  $z$  – количество лопаток.

Для варианта 1 количество узловых диаметров равно 26, МЛФУ = 176,6°. Для варианта 2 количество узловых диаметров равно 13, МЛФУ = 88,3°.

Для двух вариантов выполнены аэродинамические расчеты вращающегося лопаточного венца турбины при заданном законе гармонических колебаний лопаток.

На рис. 1 приведены графики изменения модальных коэффициентов для лопаток 1, 2, 3, 4, 52, 53 в течение одного периода колебаний (~0,5 обо-

рота ротора) для варианта 1 (рис. 1а), для варианта 2 (рис. 1б).

В расчетах учитывались одна собственная форма с частотой 110 Гц и каждая рабочая лопатка колеблется по своей собственной форме.

Аэроупругая устойчивость системы «поток воздуха – лопаточный венец» без учета механического демпфирования определяется аэродинамическим коэффициентом демпфирования  $D$ , равным взятому со знаком «минус» коэффициенту работы  $W$ , совершаемой аэродинамической нагрузкой за один период колебаний [3, 4]. Знак «минус» суммарной работы ( $D > 0$ ) соответствует аэродемпфированию, знак «плюс» – самовозбуждению лопатки ( $D < 0$ ).

Изменение коэффициента аэродемпфирования по высоте 1-й лопатки для двух вариантов приведено на рис. 2.

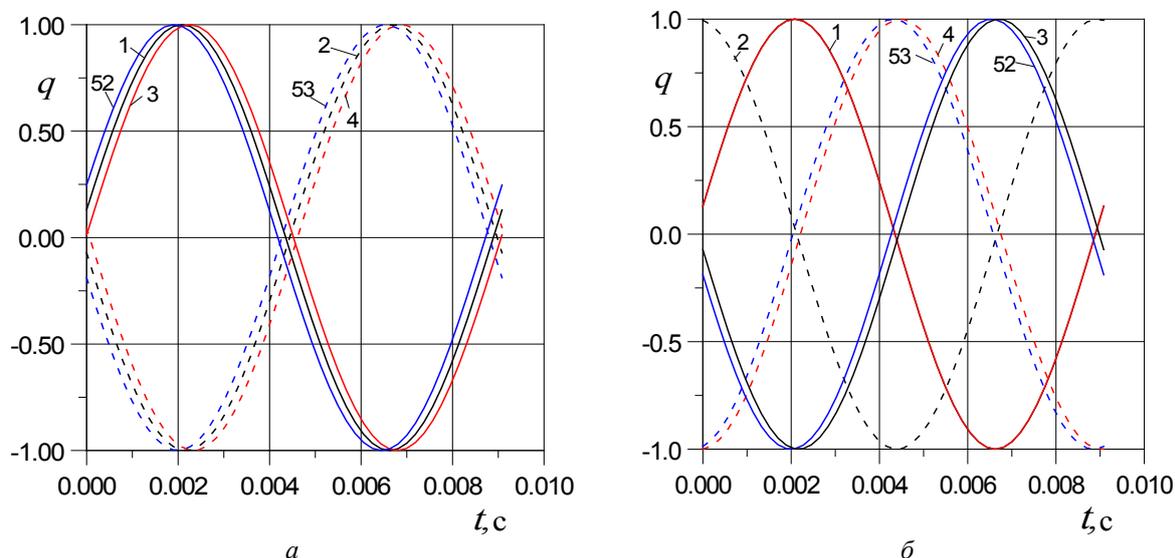


Рис. 1 – Изменение модального коэффициента для расстроенных рабочих лопаток:  
а – вариант 1; б – вариант 2

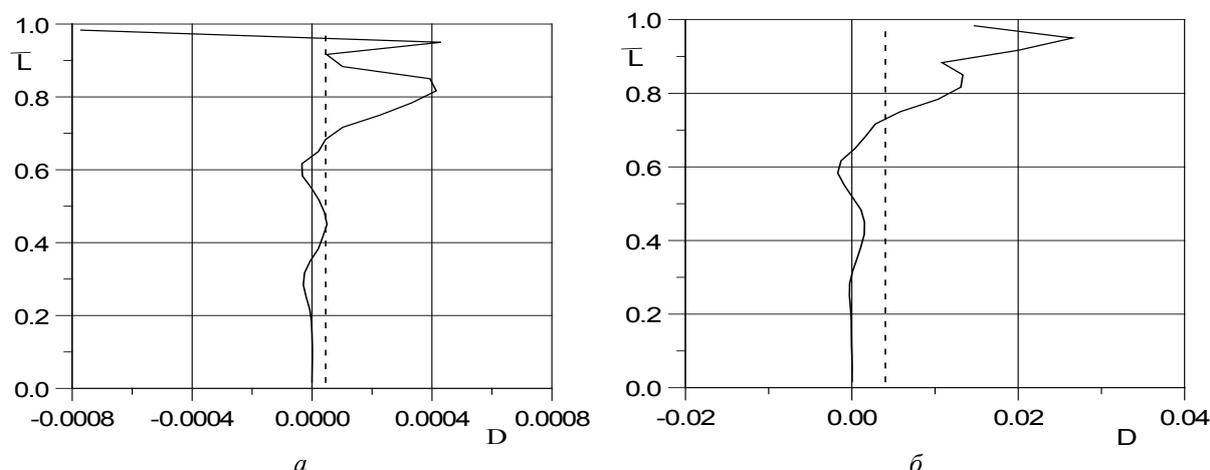


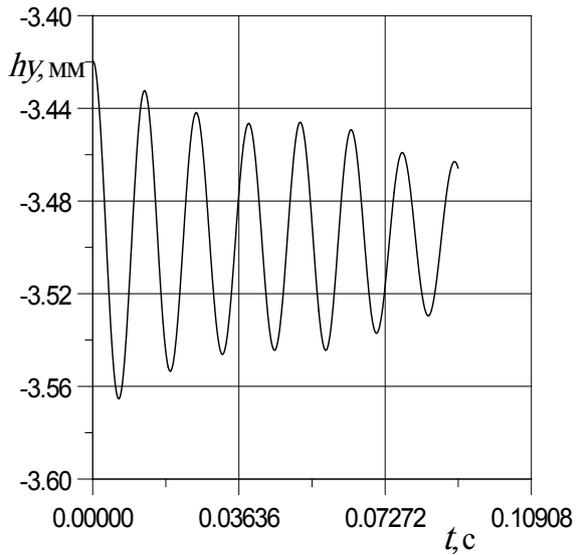
Рис. 2 – Изменение коэффициента аэродемпфирования по высоте лопатки:  
а – вариант 1; б – вариант 2

Как видно из графика (рис. 2) гармонические колебания по высоте лопатки характеризуются отводом энергии в основной поток.

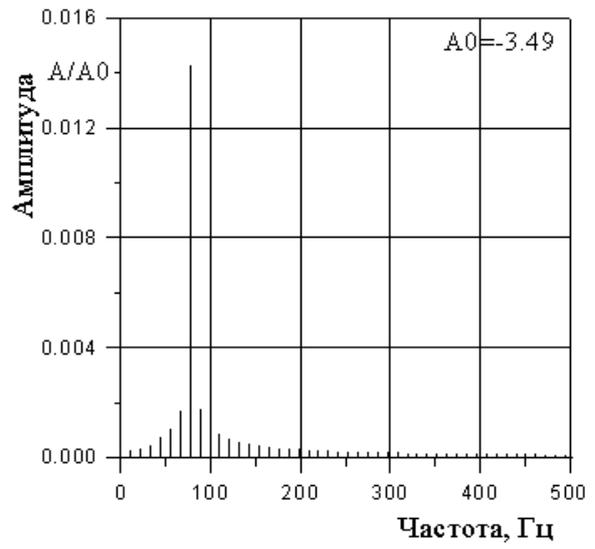
На рис. 3 приведены графики перемещения центра тяжести периферийного сечения в окружном направлении  $hy$  (вариант 1 – рис. 3а, вариант 2 – рис. 3в), осевом направлении  $hz$  (вариант 1 – рис. 3б, вариант 2 – рис. 3ж) за десять полных периодов связанных колебаний и их амплитудно-частотные спектры для  $MJFY = +176,6$  град (рис. 3б, е) и для  $MJFY = +88,3$  град (рис. 3г, з).

Как видно из графиков (рис. 3) основной вклад в колебания лопатки вносит гармоника с частотой близкой к частоте собственной формы колебаний (~100 Гц).

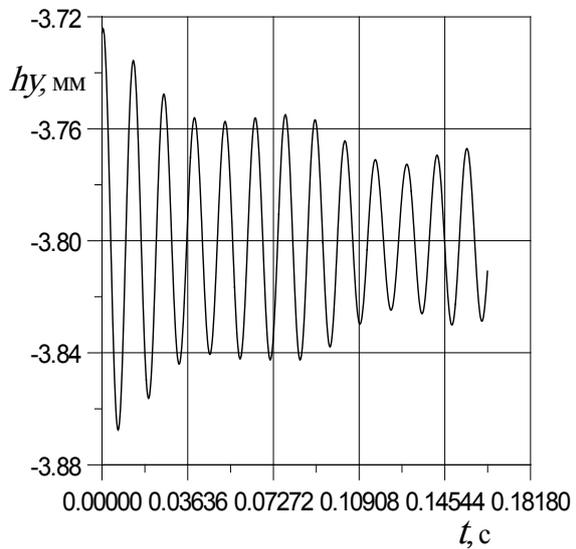
Из расчета следует, что все собственные формы колебаний демпфируются.



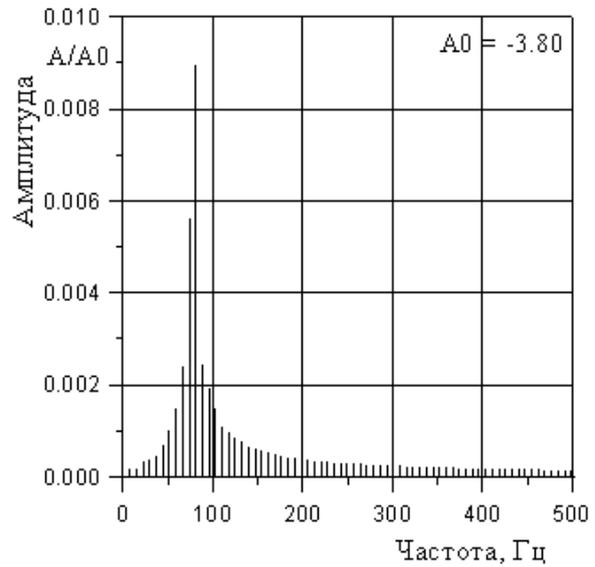
a



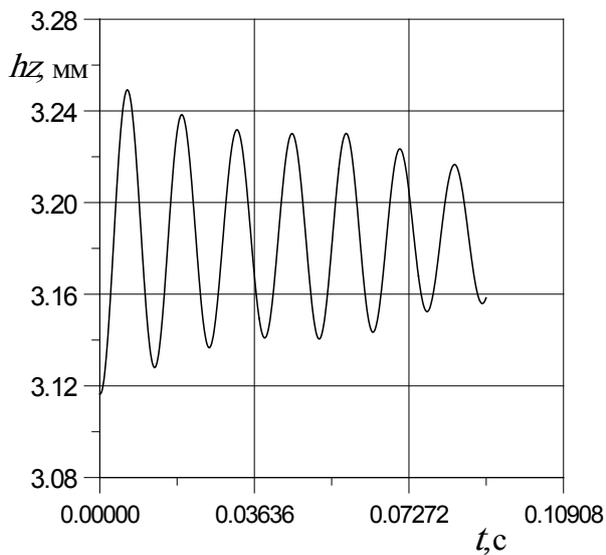
б



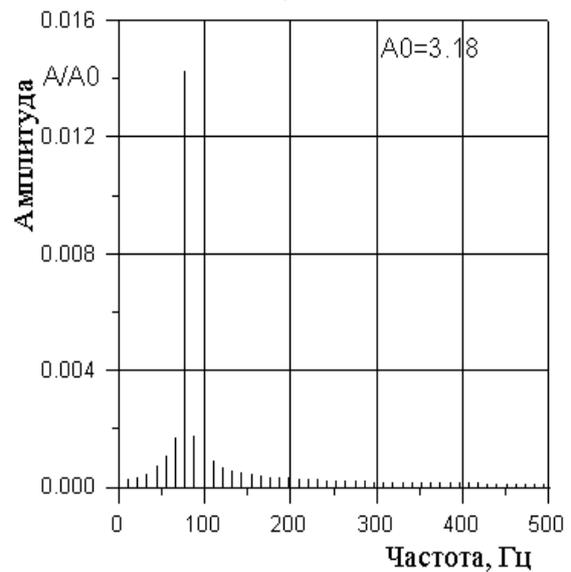
в



г



д



е

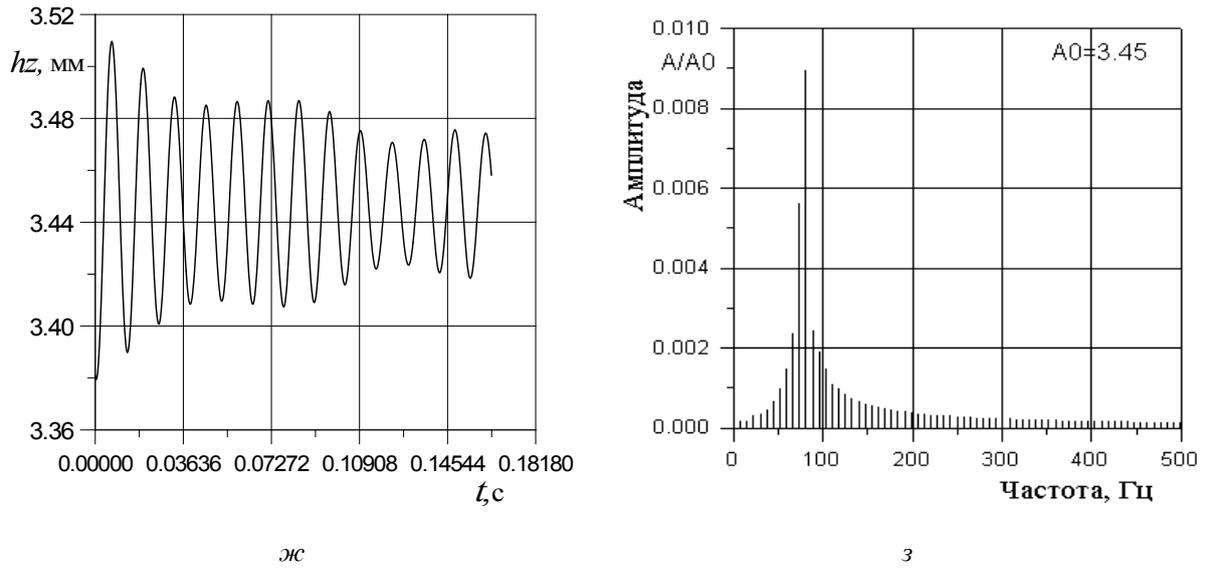
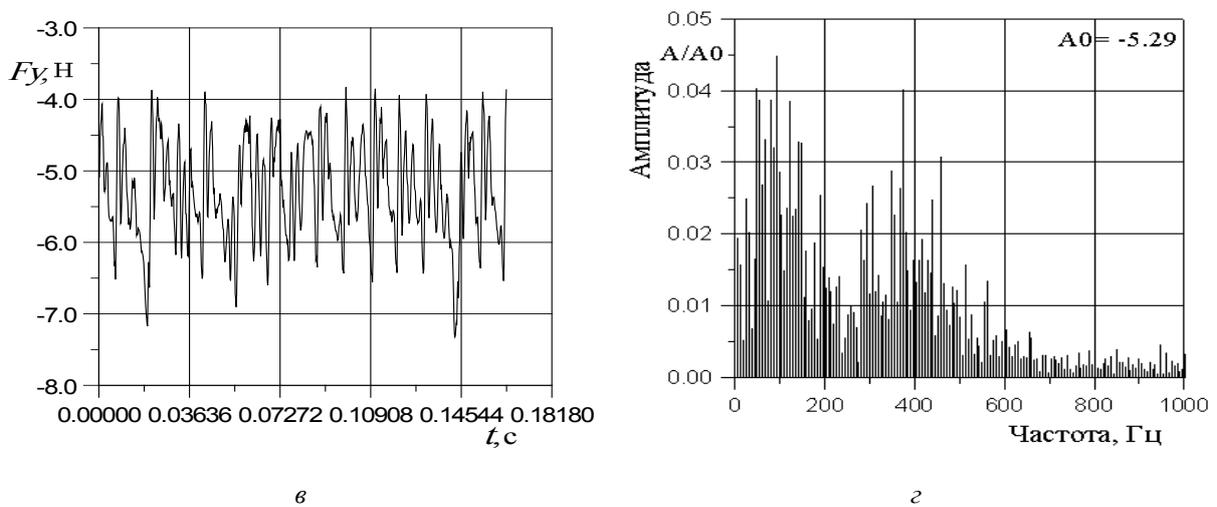
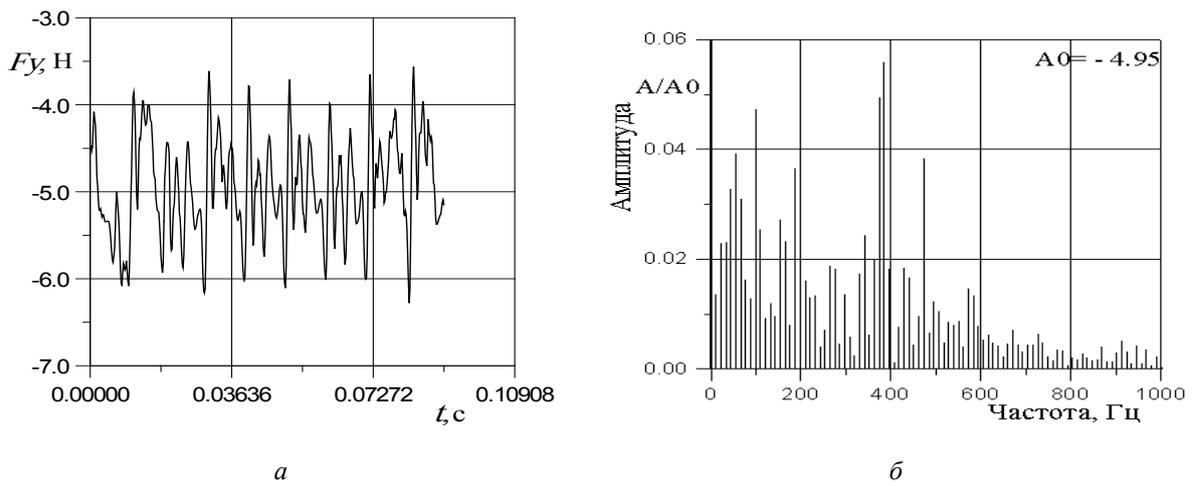


Рис. 3 – Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки ротора  
 а, в – в окружном направлении; б, г – амплитудно-частотный спектр;  
 д, ж – в осевом направлении; е, з – амплитудно-частотный спектр



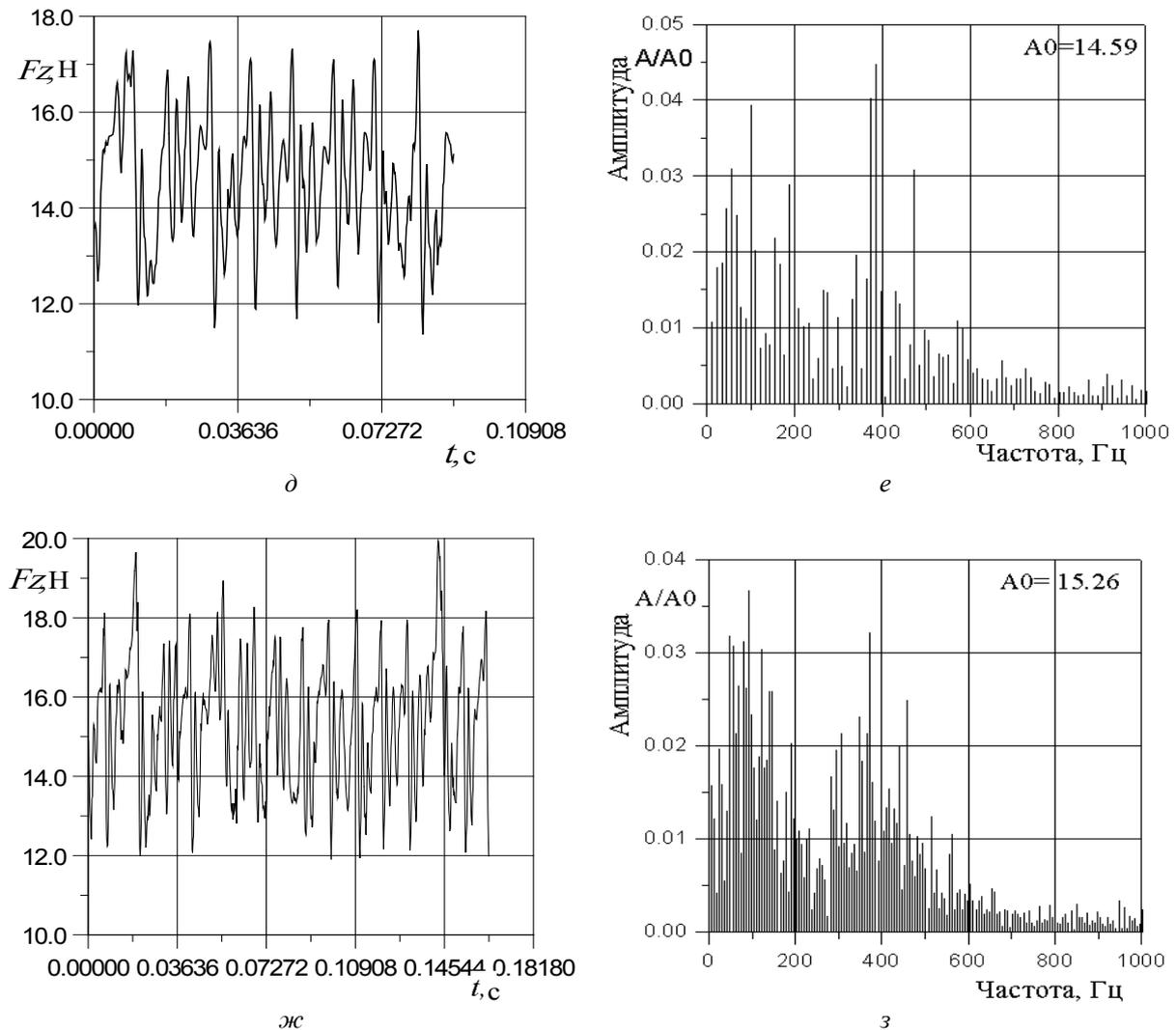


Рис. 4 – Изменение нестационарной аэродинамической силы, действующей на периферийный слой лопатки ротора:  
 $a, в$  – в окружном направлении;  $б, г$  – амплитудно-частотный спектр;  
 $д, ж$  – в осевом направлении;  $е, з$  – амплитудно-частотный спектр

Представлены графики нестационарных аэродинамических сил (окружная сила  $F_u$  (вариант 1 – рис. 4а, вариант 2 – рис. 4в), осевая сила  $F_z$  (вариант 1 – рис. 4д, вариант 2 – рис. 4ж), действующих на периферийный слой рабочих лопаток ротора и их амплитудно-частотные характеристики для МЛФУ = +176,6 град (рис. 4б, е) и для МЛФУ = +88,3 град (рис. 4г, з).

### Выводы

Проведен численный анализ влияния расстройки собственных форм и частот рабочих лопаток на нестационарные нагрузки и амплитуды колебаний рабочих лопаток турбины на основе разработанного метода расчета связанной задачи нестационарной газодинамики и упругих колебаний лопаток для двух вариантов.

Второй вариант с 13 узловыми диаметрами характеризуется более высоким значением коэффициента аэродемпфирования.

Основной вклад в аэродинамические нагрузки вносят низкочастотные гармоники вызванные колебаниями расстроенных лопаток.

Основной вклад в колебания лопаток вносят колебания с частотой близкой к частоте собственной формы.

Предложенный метод позволяет прогнозировать режимы колебаний лопаток, включая вынужденные колебания, автоколебания, флаттер с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

### Список литературы

1. Гнесин В. И., Колодяжная Л. В. Аэроупругие явления в турбомашинах. *Аэродинамика и Аэроакустика : Проблемы*

- и перспективы* : сб. научных трудов. Харьков: ХАИ, 2009. № 3. С. 53–62.
- Cinnella P., Palma De, Pascazio G., Napolitano M. A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity. *Journal of Turbomachinery*. Vol. 126. April, 2004. pp. 310–316.
  - Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow. *J. Problems in Mash. Eng.* 1999. Vol. 1, No. 2. pp. 65–76.
  - Rzadkowski R., Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine. Proceedings of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines ISUAAAT14 8-11, September 2015, Stockholm, Sweden. 2015. I14-S1-4, pp. 1–6.
  - Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва: Наука, 1976. 400 с.
  - Гнесин В. И., Колодяжная Л. В., Жандковский Р. Численный анализ трёхмерного нестационарного потока идеального газа в последней ступени турбомашин с учётом неосесимметричного выхлопного патрубка. Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПИ», 2016. № 8(1180). С. 47–53. Бібліогр.: 8 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.06.
  - Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V. (2009), "The aeroelastic phenomena in the turbomachines", *Aerogidrodynamical and Aeroacoustics: Problems and prospects*, No. 3, pp. 53–62.
  - Cinnella, P., Palma De, Pascazio G., Napolitano M. (2004), "A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 126, April, 2004. pp. 310–316.
  - 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 Mash. Eng.*, Vol. 1, No. 2, pp. 65–76.
  - Rzadkowski R., Gnesin, V. I., Kolodyazhnaya, L. V. (2015), "Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine", *Proceedings of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines ISUAAAT14 8-11, September 2015, Stockholm, Sweden*, I14-S1-4, pp. 1–6.
  - Godunov, S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Y., Krayko A. N., Prokopov G. P. (1976), *The Numerical solution of multidimensional tasks of gas dynamics*, Nauka, Moscow, 400 p.
  - Gnesin, V., Kolodyazhnaya, L. and Rzadkowski, R. (2016), "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", *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.

Поступила (received) 27.02.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Гнесін Віталій Ісайович (Гнесин Виталий Исаевич, Gnesin Vitaly)** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; м. Харків, Україна; e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6411-6158>.

**Колодяжна Любов Володимирівна (Колодяжная Любовь Владимировна, Kolodyazhnaya Lyubov)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; м. Харків, Україна; e-mail: lyubovvladimirovna60@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5469-4325>.

**Жандковські Ромуальд (Жандковски Ромуальд, Rzadkowski Romuald)** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом динаміки та аеропружності, Інститут проточних машин ПАН, м. Гданьск, Польща; e-mail: z3@imp.gda.pl, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0560-1222>.