

В. В. ДОНЧЕНКО, В. И. ГНЕСИН, Л. В. КОЛОДЯЖНАЯ, И. Ф. КРАВЧЕНКО, А. В. ПЕТРОВ

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕНТИЛЯТОРА НА НЕСТАЦИОНАРНЫЕ НАГРУЗКИ И РЕЖИМЫ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК

Стремление к повышению эффективности газотурбинных двигателей приводит к необходимости конструировать лопатки осевых турбомашин более тонкими, с большими углами атаки и предназначенными для работы при высоких скоростях вращения. Однако, эти качества увеличивают риск проявления аэроупругой неустойчивости, такой как флаттер или резонансные колебания. Флаттер представляет собой самовозбуждающуюся неустойчивость под действием аэродинамических сил, индуцированных вынужденными колебаниями лопаток, которые вызваны, в свою очередь, внешними возмущающими силами при вращении лопаток в неоднородном вверх по течению потоке. Для того, чтобы выполнить важнейшие требования надежности и безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей, необходимо уметь прогнозировать аэроупругое поведение лопаточных аппаратов 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. Хотя эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов, они привлекают корректностью постановки связанной задачи аэроупругости, учитывающей взаимное влияние колебаний лопаток и нестационарных аэродинамических нагрузок. На основании анализа современного состояния проблемы аэроупругости турбомашин и существующих методов прогнозирования флаттера можно заключить, что наиболее перспективным подходом в исследовании аэроупругого поведения лопаточного венца осевой турбомашин является подход, основанный на трехмерной модели нестационарной аэродинамики и модальном анализе движения лопатки. Предложенный численный метод решения связанной аэроупругой задачи в трехмерном транзвуковом потоке идеального газа позволяет прогнозировать аэроупругое поведение лопаток, включая вынужденные, самовозбуждающиеся колебания и автоколебания с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Ключевые слова: лопаточный венец вентилятора, собственная частота, аэроупругое поведение венца, связанная аэроупругая задача, флаттер, турбомашин.

В. В. ДОНЧЕНКО, В. І. ГНЕСІН, Л. В. КОЛОДЯЖНА, І. Ф. КРАВЧЕНКО, О. В. ПЕТРОВ

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВЕНТИЛЯТОРА НА НЕСТАЦІОНАРНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РЕЖИМИ КОЛИВАНЬ ЛОПАТОК

Прагнення до підвищення ефективності газотурбінних двигунів призводить до необхідності конструювати лопатки осьових турбомашин більш тонкими, з великими кутами атаки і призначеними для роботи при високих швидкостях обертання. Однак, ці якості збільшують ризик прояву аеропружної нестійкості, такої як флатер або резонансні коливання. Флатер – це самозбуджуюча нестійкість під дією аеродинамічних сил, індукованих вимушеними коливаннями лопаток, які викликані, в свою чергу, зовнішніми обурюючими силами при обертанні лопаток в неоднорідному вгору за течією потоці. Для того, щоб виконати найважливіші вимоги надійності та безпеки експлуатації газотурбінних двигунів, необхідно вміти прогнозувати аеропружну поведінку лопаткових апаратів ще на стадії проектування. Останнім часом розвиваються нові підходи, засновані на маршеві за часом схемі, що включає інтегрування рівнянь аеродинаміки і динаміки пружних коливань. Хоча ці методи вимагають значних обчислювальних ресурсів, вони привертають коректністю постановки зв'язаної задачі аеропружності, що враховує взаємний вплив коливань лопаток і нестационарних аеродинамічних навантажень. На підставі аналізу сучасного стану проблеми аеропружності турбомашин і існуючих методів прогнозування флатера можна зробити висновок, що найбільш перспективним підходом у дослідженні аеропружної поведінки лопаткового вінця осевої турбомашини є підхід, заснований на тривимірній моделі нестационарної аеродинаміки та модальному аналізу руху лопатки. Запропонований чисельний метод розв'язання зв'язаної аеропружної задачі в тривимірному транзвуковому потоці ідеального газу дозволяє прогнозувати аеропружну поведінку лопаток, включаючи вимушені, самозбудні коливання і автоколивання з метою підвищення надійності лопаткових апаратів турбомашин.

Ключові слова: лопатковий вінець вентилятора, власна частота, аеропружна поведінка вінця, зв'язана аеропружна задача, флатер, турбомашин.

V. DONCHENKO, V. GNESIN, L. KOLODYAZHNAYA, I. KRAVCHENKO, A. PETROV

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE FAN OPERATION MODE ON NON-STATIONARY LOADS AND REGIMES BLADE OSCILLATION

The desire to improve the effectivity of gas turbine engines leads to the need to design axial turbomachine blades thinner, with large angles of attack and designed to work at high speeds. However, these qualities increase the risk of aeroelastic instability, such as flutter or resonant vibrations. Flutter is a self-excited instability under the action of aerodynamic forces induced by forced vibrations of the blades, which are caused, in turn, by external disturbing forces when the blades rotate in an inhomogeneous upstream stream. In order to fulfill the most important requirements for the reliability and safety of operation of gas turbine engines, it is necessary to be able to predict the aeroelastic behaviour of vanes as early and more accurately as possible. Recently, new approaches have been developing based on a time-marching scheme, including the integration of aerodynamic equations and the dynamics of elastic vibrations. Although these methods require significant computational resources, they attract the correctness of the formulation of the associated aeroelasticity problem, taking into account the mutual influence of the oscillations of the blades and unsteady aerodynamic loads. Based on the analysis of the current state of the problem of aeroelasticity of turbomachines and existing methods for predicting flutter, it can be concluded that the most promising approach to studying the aeroelastic behaviour of the blade rim of an axial turbomachine is an approach based on a three-dimensional model of unsteady aerodynamics and a modal analysis of blade motion. The proposed numerical method of coupled aeroelastic problem solution for three-dimensional transonic ideal gas flow allows to predict aeroelastic behaviour of blades including the forced, self-excitation oscillations and autooscillations with purpose to increase the reliability of turbomachines blades devices.

Keywords: blade row fan, the natural frequency, aeroelastic behaviour of blade row, coupled aeroelastic problem, flutter, turbomachine.

Введение. Поведение упругих тел в потоке с вынужденные колебания и самовозбуждающиеся позиции теории колебаний, можно разделить на колебания. Это деление основано на характере обмена

© В. В. Донченко, В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, И. Ф. Кравченко, А. В. Петров, 2020

энергией между потоком и колеблющейся системой.

При вынужденных колебаниях энергия подводится порциями, так как периодическим является источник энергии (неоднородный поток). Вынужденные колебания являются устойчивыми колебаниями с частотой возмущающей силы.

Самовозбуждающиеся колебания характеризуются непрерывным обменом энергией между колеблющейся системой и основным потоком и могут проявляться в следующих направлениях:

- аэродемпфирование (затухание колебаний лопаток), когда энергия колеблющейся системы отводится в основной поток;

- автоколебания, когда за период колебаний количество энергии, подведенное от основного потока к колеблющейся системе, равно количеству энергии, отведенной от колеблющейся системы в основной поток. Автоколебания являются устойчивой формой колебаний, частота которых зависит от жесткости механической системы;

- неустойчивые самовозбуждающиеся колебания (флаттер), когда энергия основного потока подводится к колеблющейся системе, при этом амплитуда колебаний возрастает, что может привести к разрушению механической системы.

Требование высокой надежности и безопасности турбомашин приводит к необходимости разработки новых совершенных методов и моделей, которые учитывают реальные физические свойства потока газа и конструкции лопаточных аппаратов [1–15].

В статье представлен численный анализ аэроупругого поведения вибрирующего лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя на основе численного метода решения задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток, уравнения которых интегрируются параллельно-последовательно с обменом информацией на каждой итерации [1–4].

Предложенный метод решения связанной аэроупругой задачи позволяет прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Цель работы. Цель данной работы – численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя для заданного режима эксплуатации с целью повышения надежности и продления ресурса вентилятора авиационного двигателя.

Постановка задачи. 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. Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик [1, 2, 16].

Динамическая модель колеблющейся лопатки с использованием модального подхода приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных

форм. Перемещения и скорость лопатки, полученные из решения динамической задачи, на каждой итерации используются в качестве граничных условий в аэродинамической задаче [3, 7, 16, 17].

Расчетная область включает 24 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 Н–Н разностной сетки (рис. 1).

Для численного интегрирования уравнений Эйлера применяется разностная схема Годунова-Колгана 2-го порядка точности по координатам и времени, обобщенная на случай произвольной пространственной деформируемой разностной сетки [2, 18].

Алгоритм решения аэроупругой связанной задачи основан на последовательном по времени интегрировании уравнений газодинамики и уравнений колебаний лопаток с обменом информацией на каждой итерации (рис. 2) [1–4, 19, 20].

Здесь f – символический вектор аэродинамических параметров; u, \dot{u} – перемещение и скорость лопатки; \vec{F} – вектор сил, распределенных по поверхности лопатки.

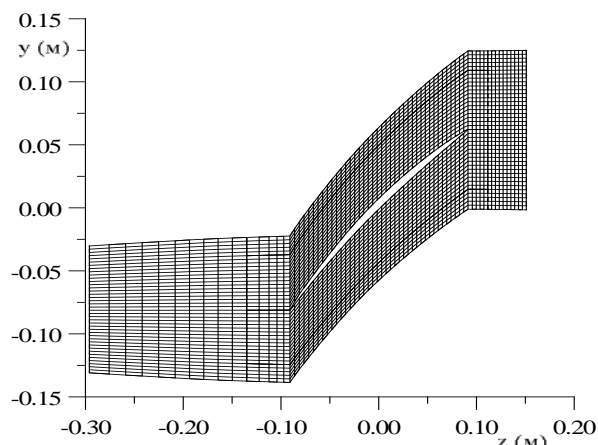


Рис. 1. Дифференциальная разностная сетка в тангенциальном среднем сечении



Рис. 2. Блок-схема решения связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний лопаток

Численный анализ. Численное исследование проведено для лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя в трехмерном потоке идеального газа.

Граничные условия для режима эксплуатации вентилятора:

- полное давление на входе $P_0 = 90500\text{--}93600$ Па;
- полная температура на входе $T_0 = 291$ К;
- углы потока в окружном и радиальном направлениях заданы;
- статическое давление на выходе за вентилятором $P_2 = 112000\text{--}117000$ Па;
- скорость вращения лопаточного венца $n = 5810$ об/мин.

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

Таблица 1 – Собственные частоты

Собственная форма	Частота ν , Гц
1	119
2	263
3	415
4	524
5	640

Деформации рабочей лопатки, соответствующие 1-й собственной форме колебаний показаны на рис. 3 (перемещения центра тяжести лопатки вдоль высоты лопатки в окружном направлении (рис. 3, а), в осевом направлении (рис. 3, б) и поворот сечения лопатки относительно центра тяжести (рис. 3, в)).

На первом этапе выполнены аэродинамические расчеты потока газа через вращающийся лопаточный венец для гармонических колебаний лопаток при межлопаточном угле сдвига по фазе колебаний лопаток $MЛФУ = 0$ с учетом взаимодействия 1–5 собственных форм.

Все лопатки совершают гармонические колебания по каждой из собственных форм по одному и тому же закону с постоянным углом сдвига фаз δ (МЛФУ):

$$q_{ij} = q_{i0} \cdot \sin[2\pi\nu_i t + (j - 1) \cdot \delta],$$

- где q_{ij} – модальный коэффициент;
 i – номер собственной формы;
 j – номер лопатки;
 q_{i0} – амплитуда колебаний i -й собственной формы;
 ν_i – собственная частота;
 δ – межлопаточный угол сдвига по фазе колебаний соседних лопаток.

Характер обмена энергией между потоком воздуха и колеблющимися лопатками показан на рис. 4 (график изменения коэффициента аэродемпфирования по высоте лопатки для $MЛФУ = 0$). Как видно из графика, коэффициент аэродемпфирования $D > 0$ ($W < 0$), что соответствует отводу энергии от лопатки к потоку

(аэродемпфирование колебаний).

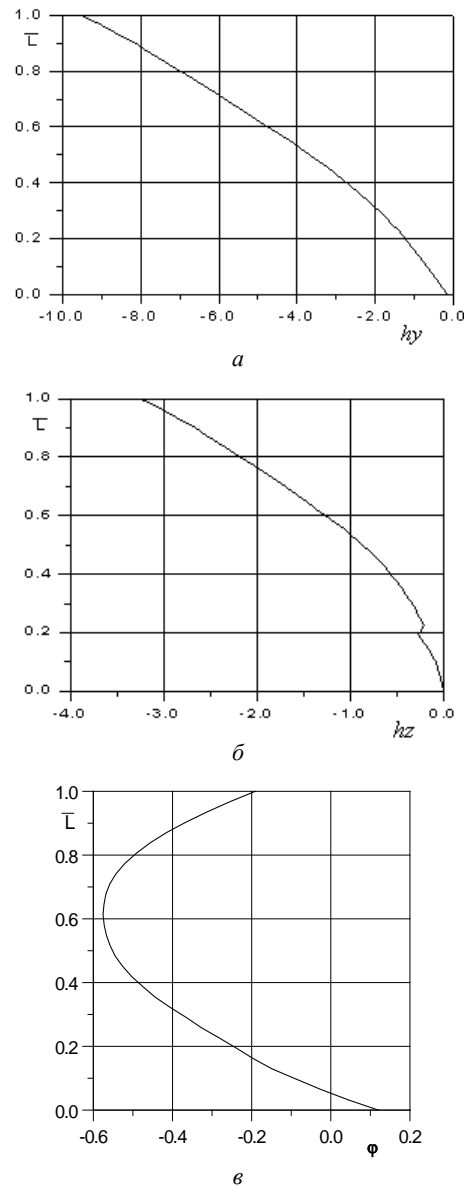


Рис. 3. Перемещения центра тяжести лопатки по 1-й собственной форме вдоль высоты лопатки: а – в окружном направлении; б – в осевом направлении; в – поворот относительно центра тяжести

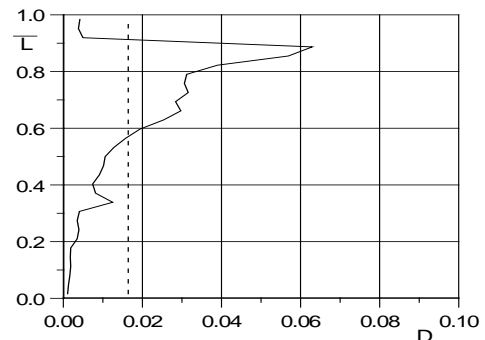


Рис. 4. Изменение коэффициента аэродемпфирования по высоте лопатки ($MЛФУ = 0$ град, 1–5 собственная форма)

На втором этапе расчета приведены результаты численного анализа нестационарных

аэродинамических характеристик лопаточного венца для МЛФУ=0 градус при связанных колебаниях лопаток.

На рис. 5 приведены графики изменения во времени модальных коэффициентов $q_i (i = 1-5)$ для МЛФУ=0 град с учетом взаимодействия пяти собственных форм (рис. 5, а, в) и их амплитудно-частотные характеристики (рис. 5, б, г) в течение 40 оборотов ротора.

На графиках представлены один период гармонических колебаний ($t = 0-0,0419$ с) и 39 периодов связанных колебаний.

Как следует из графиков, по 1-й собственной форме происходит переход к режиму автоколебаний с частотой близкой к собственной частоте 1-й формы. По всем остальным собственным формам происходит затухание колебаний (рис. 5, в, г).

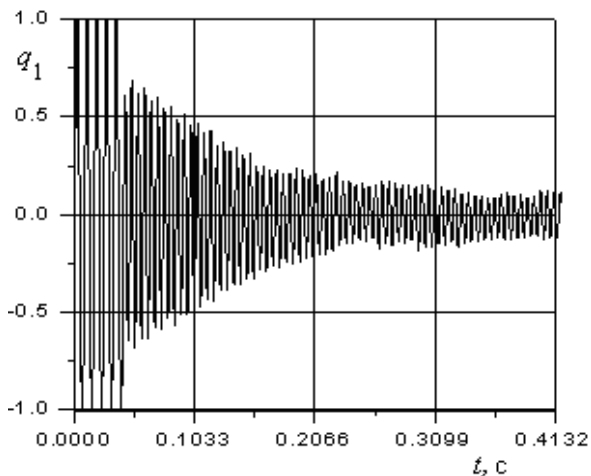
Движение лопаток определяется нестационарными аэродинамическими нагрузками, действующими на лопатки, и деформацией лопаток (связанные аэроупругие колебания).

На рис. 6, а, в, д представлены графики нестационарных аэродинамических нагрузок (окружная, осевая и аэродинамический момент), действующих на периферийный слой рабочей лопатки в течение 40 периодов колебаний лопаток ротора, из которых один период гармонических колебаний, а также их амплитудно-частотные спектры (рис. 6, б, г, е).

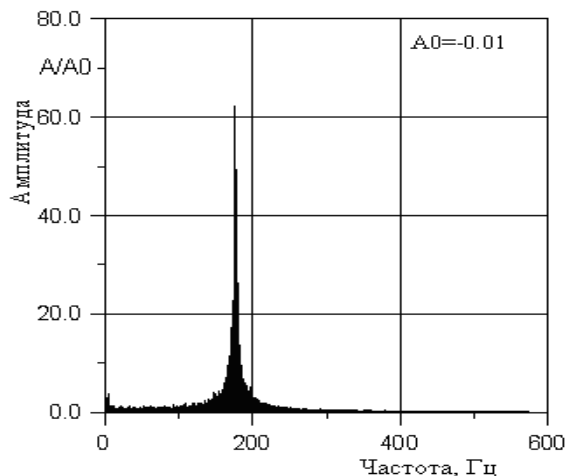
Как видно из графиков, основной вклад в нестационарные составляющие аэродинамических нагрузок вносят низкочастотные гармоники, вызванные неравномерностью в окружном направлении за ротором, и колебаниями лопаток по собственным формам.

Перемещение периферийного сечения рабочей лопатки в окружном, осевом направлениях и поворот относительно центра тяжести, а также их амплитудно-частотные спектры показаны на рис. 7.

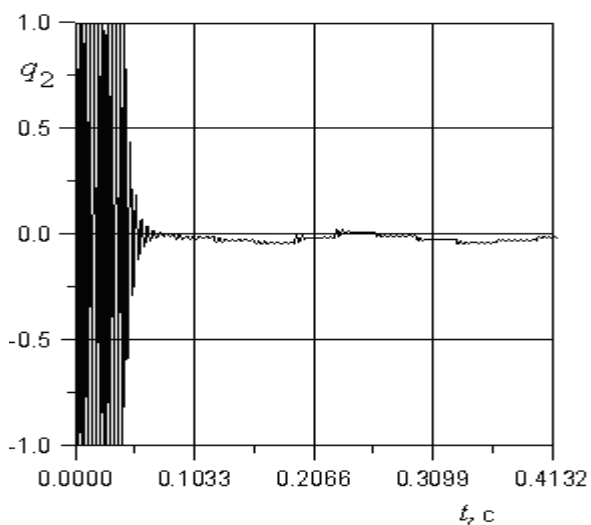
Как видно из графиков (рис. 7, б, г, е), основной вклад в колебания лопаток вносят автоколебания с частотами собственных форм.



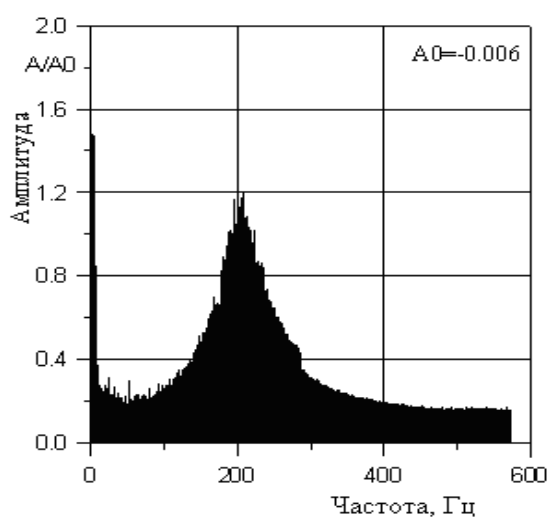
а



б

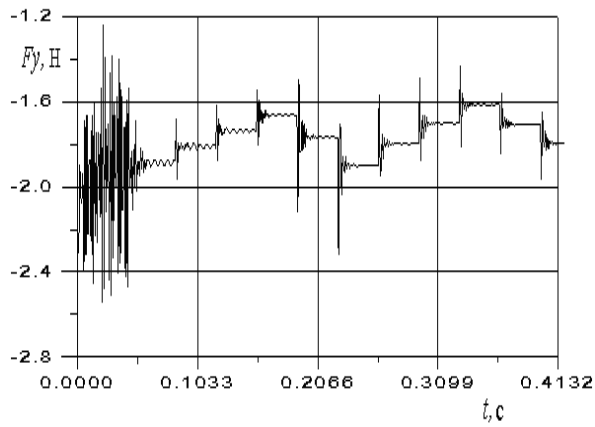


в

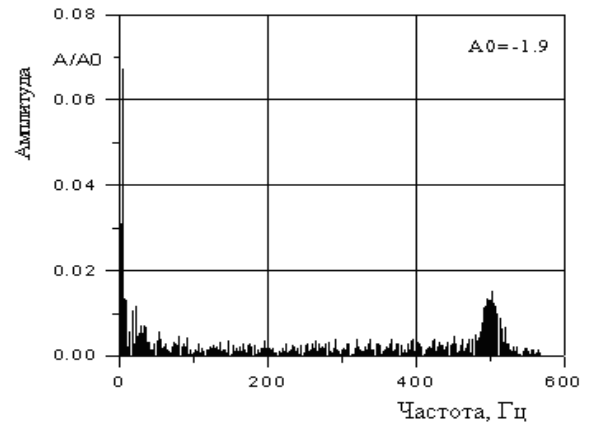


г

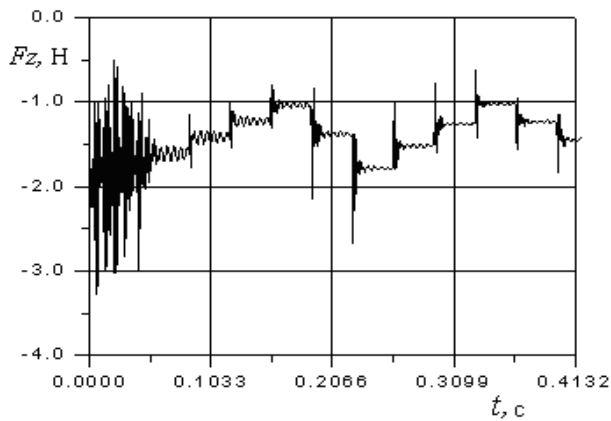
Рис. 5. Изменение модального коэффициента по 1-й и 2-й собственным формам (МЛФУ = 0): а, в – модальный коэффициент; б, г – амплитудно-частотный спектр



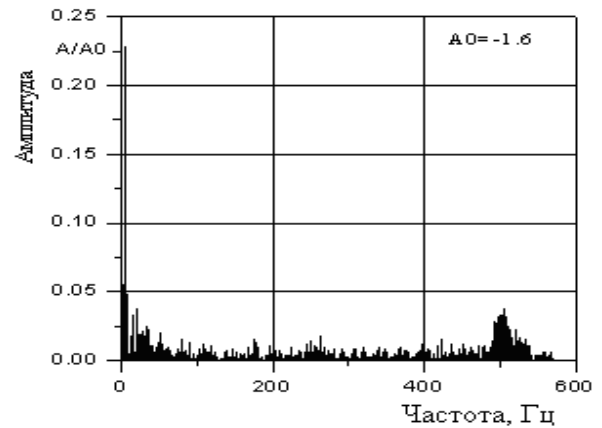
a



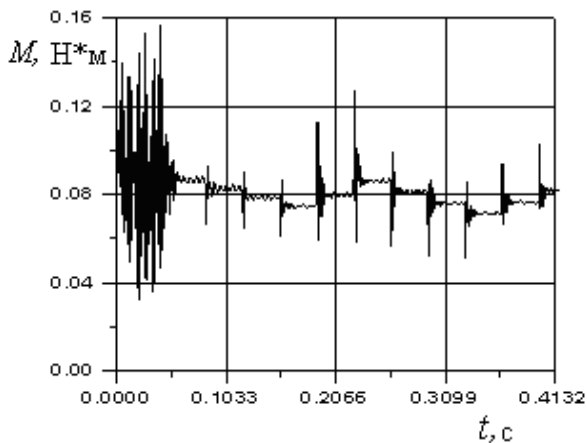
б



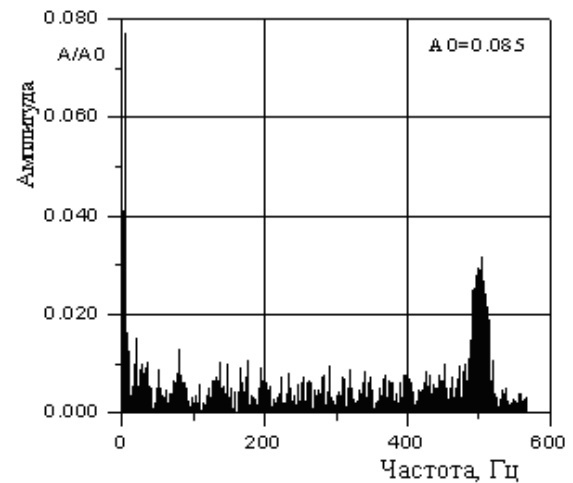
в



г



д



е

Рис. 6. Аэродинамическая нагрузка в периферийном слое рабочей лопатки:
a, б – окружная сила; *в, г* – осевая сила; *д, е* – аэродинамический момент

Выводы. Проведен численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца вентилятора для режима эксплуатации ($n = 5810$ об/мин).

При данном режиме эксплуатации происходит аэродемпфирование и переход к устойчивым колебаниям лопаток с минимальной амплитудой колебаний (автоколебания).

Основной вклад в колебания лопаток вносят колебания с частотой близкой к частоте 1-й и 2-й собственных форм.

Предложенный метод решения связанной задачи аэроупругости позволяет прогнозировать режимы колебаний лопаток и нестационарные нагрузки с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

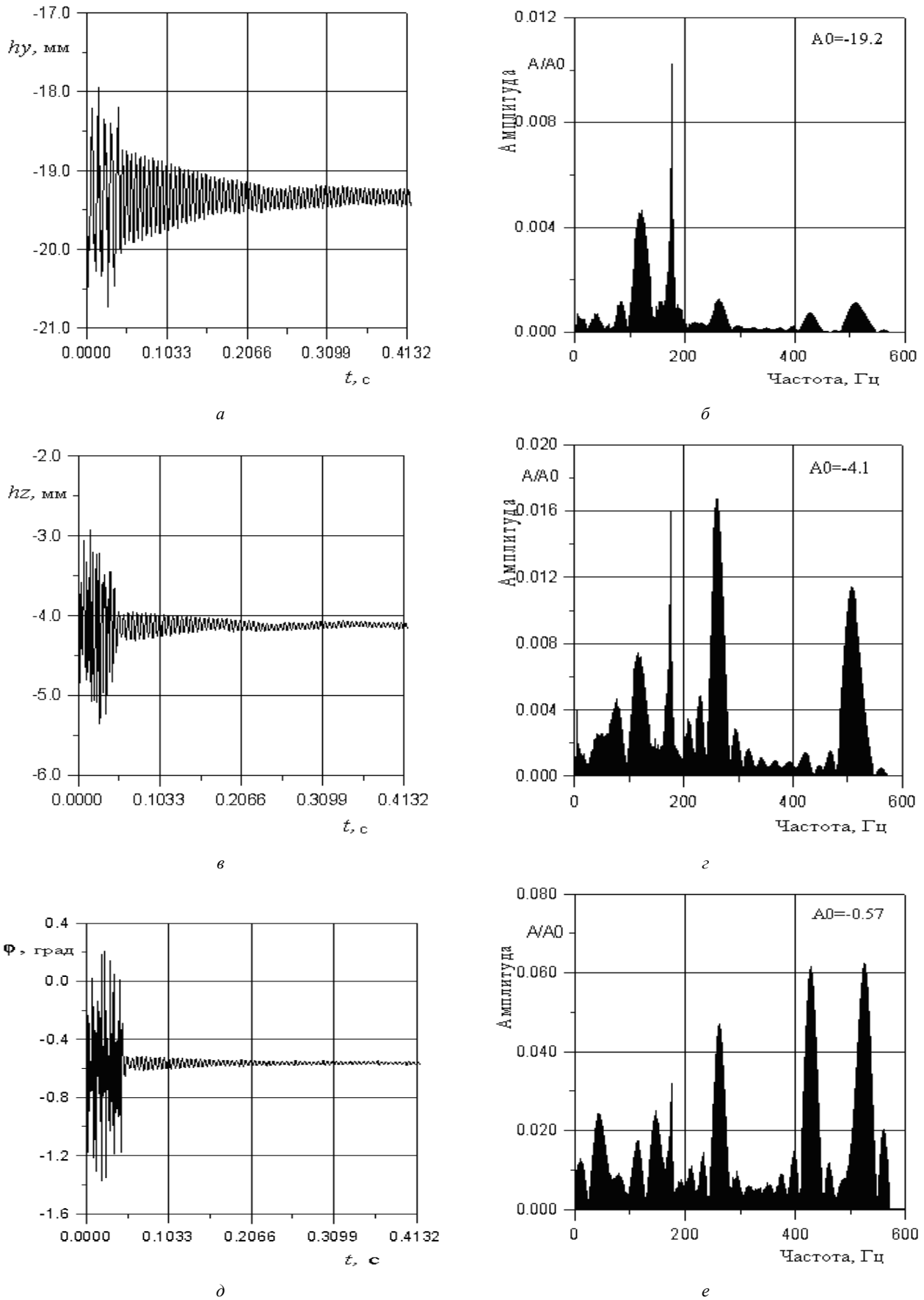


Рис. 7. Колебания периферийного сечения рабочей лопатки:
 а, б, – в окружном направлении; в, г – в осевом направлении; д, е – угол поворота относительно центра тяжести

Список литературы

- Гнесин В. И., Колодяжная Л. В. Аэроупругий анализ лопаточного венца турбомашин на основе численного решения связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний. *Проблемы машиностроения*. 1998. № 3–4. С. 29–40.
- Гнесин В. И., Колодяжная Л. В., Жандковски Р., Демченко А. В. Математическое моделирование и анализ аэроупругих явлений в лопаточном венце турбомашин. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 17 (1293). P. 17–24.
- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Aeroelastic analysis of vibrating blade row using a coupled fluid-structure problem. *Proc. of 14th Intern. Sump. on Air Breathing Engines*. Florence, Italy, 1999. P. 1–9.
- Гнесин В. И., Колодяжная Л. В., Кравченко И. Ф., Меркулов В. М., Шереметьев А. В., Петров А. В. Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя. *Проблемы машиностроения*. 2017. Т. 20, № 3. С. 3–11.
- Колотников М. Е., Макаров П. В., Сачин В. М. Исследование динамической напряженности широкохордного вентилятора при стендовых испытаниях. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. Т. 56, № 9. С. 58–64.
- Стельмах А. Л., Зиньковский А. П., Стельмах Я. А. Экспериментально-расчетное исследование динамической устойчивости изгибно-крутильных колебаний компрессорных лопаток при безотрывном и срывном обтекании. Сообщение 3. Взаимные аэродинамические связи. *Проблемы прочности*. 2010. № 3. С. 89–99.
- Rzadkowski R., Soliński M., Szczepanik R. The unsteady low-frequency aerodynamic forces acting on the rotor blade in the first stage of an jet engine axial compressor. *Advances in Vibration Engineering*. 2012. Vol. 11, iss. 2. P. 193–204.
- Soliński M., Rzadkowski R., Szczepanik R., Drewczyński M. The unsteady low-frequency forces acting on the rotor blade in the first stage on an axial compressor of SO-3 jet engine. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2014. Vol. 2, iss. 4. P. 385–393.
- Petrie-Repar P., Fuhrer C., Grübel M., Vogt D. Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case. *Proc. of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (8–11 September 2015, Stockholm, Sweden)*. Stockholm: ISUAAAT14 Organizing Committee, 2015. P. 33–43.
- Petrie-Repar P., Makhnov V., Shabrov N., Smirnov E. Analysis of a Long Shrouded Steam Turbine. *Proc. of ASME Turbo Expo 2014. Vol. 7B: Structures and Dynamics (16–20 June 2014, Düsseldorf, Germany)*. P. GT2014–26874. doi: 10.1115/GT2014-26874
- Wang Wei-Ze, Xuan Fu-Zhen, Zhu Kui-Long, Tu Shan-Tung. Failure Analysis of the Final Stage Blade in Steam Turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2007. Vol. 14. P. 632–641. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.03.004
- Rzadkowski R., Surwilo J., Kubitz L., Lampart P., Szymaniak M. Unsteady Forces in Last Stage LP Steam Turbine Rotor Blades With Exhaust Hood. *Proc. of ASME Turbo Expo 2016. Vol. 7B: Structures and Dynamics (13–17 June 2016, Seoul, South Korea)*. P. GT2016–57610. doi: 10.1115/GT2016-57610
- Sanvito M., Pesatori E., Bachschmidt N., Chatterton S. Analysis of LP steam turbine blade vibration: experimental results and numerical simulations. *10th Int. Conf. on Vibrations in Rotating Machinery (11–13 September 2012, London)*. London: IMechE, 2012. P. 189–197.
- Chassaing J. C., Gerolymos G. A. Compressor Flutter Analysis Using Time Nonlinear and Time Linearized 3D Navier-stokes Method. *Proc. of the 9th International Symposium held in Lyon "Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines"*. Grenoble, France: Universitaires de Grenoble Publ., 2001.
- Huang X. Q., He L., Bell D. L. Influence of Upstream Stator on Rotor Flutter Stability in a Low Pressure Steam Turbine Stage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2006. Vol. 220, iss. 1. P. 25–35.
- Rzadkowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L., Szczepanik R. Aeroelastic Behaviour of First Stage Compressor Rotor Blades With Foreign Object in Engine Inlet. *Proc. of the 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (11–14 September 2012, Tokyo, Japan)*. Tokyo: ISUAAAT 12, 2012. P. 3–4.
- Kubitz L., Rzadkowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. Direct Integration Method in Aeroelastic Analysis of Compressor and Turbine Rotor Blade. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2016. Vol. 4, iss. 1. P. 37–42.
- 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.
- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow. *Journal Problems in Mash. Eng.* 1999. Vol. 1, no. 2. P. 65–76.
- Rzadkowski R., Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine. *Proc. of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (8–11 September 2015, Stockholm, Sweden)*. Stockholm: ISUAAAT14 Organizing Committee, 2015. P. 1–6.

References (transliterated)

- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Aerouprugiy analiz lopatochnogo ventsa turbomashiny na osnove chislennoy resheniya svyazannoy zadachi aerodinamiki i uprugikh kolebaniy [Aeroelastic analysis of a turbomachine blade row based on the numerical solution of a coupled problem of aerodynamics and elastic vibrations]. *Problemy mashinostroeniya*. 1998, no. 3–4, pp. 29–40.
- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V., Zhandkovski R., Demchenko A. V. Matematicheskoe modelirovanie i analiz aerouprugikh yavleniy v lopatochnom ventse turbomashin [The mathematic modeling and analysis of aeroelastic phenomena in turbomachine blade row]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 17 (1293), pp. 17–24.
- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Aeroelastic analysis of vibrating blade row using a coupled fluid-structure problem. *Proc. of 14th Intern. Sump. on Air Breathing Engines*. Florence, Italy, 1999, pp. 1–9.
- Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V., Kravchenko I. F., Merkulov V. M., Sheremet'ev A. V., Petrov A. V. Chislennyy analiz aerouprugogo povedeniya lopatochnogo ventsa ventilatora aviatsionnogo dvigatelya [Numerical analysis of the aeroelastic behavior of an aircraft engine fan blade]. *Problemy mashinostroeniya*. 2017, vol. 20, no 3, pp. 3–11.
- Kolotnikov M. E., Makarov P. V., Sachin V. M. Issledovanie dinamicheskoy napryazhennosti shirokokhordnogo ventilatora pri stendovyykh ispytaniyakh [Investigation of the dynamic tension of a wide-chord fan during bench tests]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2008, vol. 56, no. 9, pp. 58–64.
- Stel'makh A. L., Zin'kovskiy A. P., Stel'makh Ya. A. Eksperimental'no-raschetnoe issledovanie dinamicheskoy ustoychivosti izgibno-krutit'nykh kolebaniy kompressornykh lopatok pri bezotryvnom i sryvnom obtekanii. Soobshchenie 3. Vzaimnye aerodinamicheskie svyazi [Experimental and computational study of the dynamic stability of flexural and torsional vibrations of compressor blades in a continuous and stall flow. Communication 3. Mutual aerodynamic connections]. *Problemy prochnosti*. 2010, no. 3, pp. 89–99.
- Rzadkowski R., Soliński M., Szczepanik R. The unsteady low-frequency aerodynamic forces acting on the rotor blade in the first stage of an jet engine axial compressor. *Advances in Vibration Engineering*. 2012, vol. 11, issue 2, pp. 193–204.
- Soliński M., Rzadkowski R., Szczepanik R., Drewczyński M. The unsteady low-frequency forces acting on the rotor blade in the first stage on an axial compressor of SO-3 jet engine. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2014, vol. 2, issue 4, pp. 385–393.
- Petrie-Repar P., Fuhrer C., Grübel M., Vogt D. Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case. *Proc. of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (8–11 September 2015, Stockholm, Sweden)*. Stockholm, ISUAAAT14 Organizing Committee Publ., 2015, pp. 33–43.
- Petrie-Repar P., Makhnov V., Shabrov N., Smirnov E. Analysis of a

- Long Shrouded Steam Turbine. *Proc. of ASME Turbo Expo 2014. Vol. 7B: Structures and Dynamics (16–20 June 2014, Düsseldorf, Germany)*. P. GT2014–26874. doi: 10.1115/GT2014-26874
11. Wang Wei-Ze, Xuan Fu-Zhen, Zhu Kui-Long, Tu Shan-Tung. Failure Analysis of the Final Stage Blade in Steam Turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2007, vol. 14, pp. 632–641. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.03.004
 12. Rzakowski R., Surwilo J., Kubitz L., Lampart P., Szymaniak M. Unsteady Forces in Last Stage LP Steam Turbine Rotor Blades With Exhaust Hood. *Proc. of ASME Turbo Expo 2016. Vol. 7B: Structures and Dynamics (13–17 June 2016, Seoul, South Korea)*. P. GT2016–57610. doi: 10.1115/GT2016-57610
 13. Sanvito M., Pesatori E., Bachschmidt N., Chatterton S. Analysis of LP steam turbine blade vibration: experimental results and numerical simulations. *10th Int. Conf. on Vibrations in Rotating Machinery (11–13 September 2012, London)*. London, ImechE Publ., 2012, pp. 189–197.
 14. Chassaing J. C., Gerozymos G. A. Compressor Flutter Analysis Using Time Nonlinear and Time Linearized 3D Navier-stokes Method. *Proc. of the 9th International Symposium held in Lyon "Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines"*. Grenoble, France, Universitaires de Grenoble Publ., 2001.
 15. Huang X. Q., He L., Bell D. L. Influence of Upstream Stator on Rotor Flutter Stability in a Low Pressure Steam Turbine Stage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2006, vol. 220, issue 1, pp. 25–35.
 16. Rzakowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L., Szczepanik R. Aeroelastic Behaviour of First Stage Compressor Rotor Blades With Foreign Object in Engine Inlet. *Proc. of the 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (11–14 September 2012, Tokyo, Japan)*. Tokyo, ISUAAAT 12 Publ., 2012, pp. 3–4.
 17. Kubitz L., Rzakowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. Direct Integration Method in Aeroelastic Analysis of Compressor and Turbine Rotor Blade. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2016, vol. 4, issue 1, pp. 37–42.
 18. Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ya., Krayko A. N., Prokopov G. P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 400 p.
 19. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow. *Journal Problems in Mash. Eng.* 1999, vol. 1, no. 2, pp. 65–76.
 20. Rzakowski R., Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Rotor Blade Flutter in Last Stage of LP Steam Turbine. *Proc. of the 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics & Aeroelasticity of Turbomachines (8–11 September 2015, Stockholm, Sweden)*. Stockholm, ISUAAAT14 Organizing Committee Publ., 2015, pp. 1–6.

Поступила (received) 15.07.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Донченко Вячеслав Володимирович (Донченко Вячеслав Владимирович, Donchenko Viacheslav) – ДП «Івченко-Прогрес», інженер-конструктор 1-ї категорії; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9585-2991>; e-mail: 03530@ivchenko-progress.com

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

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

Кравченко Ігор Федорович (Кравченко Игорь Федорович, Kravchenko Igor) – доктор технічних наук, академік Інженерної академії України, ДП «Івченко-Прогрес», директор, генеральний конструктор; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: progress@ivchenko-progress.com

Петров Олексій Володимирович (Петров Алексей Владимирович, Petrov Olexsii) – кандидат технічних наук, ДП «Івченко-Прогрес», керівник групи статичної та динамічної міцності роторів компресорів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-0125>; e-mail: 03530@ivchenko-progress.com