

¹ В. И. Гнесин, д-р техн. наук
¹ Л. В. Колодяжная, д-р техн. наук
² И. Ф. Кравченко, д-р техн. наук
² В. М. Меркулов, канд. техн. наук
² А. В. Шереметьев, канд. техн. наук
² А. В. Петров, канд. техн. наук

¹ Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, e-mail: gnesin@ukr.net
² ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье, e-mail: velichkota@ivchenko-progress.com

Ключові слова: вентилятор, тривимірний ідеальний потік, чисельне моделювання, нестационарні навантаження, аеропружні характеристики.

УДК 621.165

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ВЕНТИЛЯТОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Наведений чисельний аналіз аеропружної поведінки віброуючого вінця лопатки вентилятора авіаційного двигуна. Чисельний метод ґрунтується на розв'язанні задачі нестационарної аеродинаміки і пружних коливань лопаток, рівняння яких інтегруються паралельно-послідовно з обміном інформацією на кожній ітерації. Наведені результати розрахунків аеропружних характеристик і коефіцієнтів аеродемпфування вінця лопатки вентилятора при гармонічних і зв'язаних коливаннях лопаток для заданих режимів граничних умов на вході і виході за вінцем. Проведений чисельний аналіз впливу частоти 1-ї власної форми на режим коливань лопаток з урахуванням взаємодії п'яти власних форм. Показано, що підвищення частоти 1-ї власної форми приводить до підвищення аеродинамічної стійкості коливань лопаток.

Введение

Проблема прогнозирования аэроупругого поведения лопаток и аэроупругой неустойчивости (флаттер, резонансные колебания) приобретает особую важность при разработке высоконагруженных компрессорных и вентиляторных венцов авиационных двигателей, длинные и гибкие лопатки которых могут быть подвержены этим явлениям.

Обтекание лопаточных аппаратов потоком газа сопровождается нестационарным силовым взаимодействием аэродинамических, упругих и инерционных сил, которое составляет основу физического механизма самовозбуждающихся колебаний. Самовозбуждающиеся колебания могут либо затухать (аеродемпфирование), либо проявляться в устойчивой форме колебаний с постоянной амплитудой, либо в неустойчивой форме флаттера. Для того чтобы выполнить важнейшие требования надежности и безопасности авиационных двигателей, необходимо уметь прогнозировать аэроупругое поведение лопаточных аппаратов как можно раньше и точнее.

Традиционный подход к расчету флаттера облопаченных дисков основан на методе частотного анализа [1, 2], в котором предполагается, что движение лопаток описывается гармоническими функциями по времени с постоянным углом сдвига фаз между соседними лопатками. Данный подход игнорирует эффект обратной связи влияния колеблющихся лопаток на основной поток газа.

В последнее время развиты новые подходы для исследования аэроупругого поведения лопаточных венцов в трехмерном потоке идеального газа, основанные на последовательном интегрировании по времени уравнений движения газа и колебаний лопаток с обменом информацией на каждой итерации [3–6]. Разработанный авторами метод решения связанной аэроупругой задачи позволяет прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток в трехмерном потоке идеального газа, включая вынужденные и самовозбуждающиеся колебания с целью повышения экономичности и надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

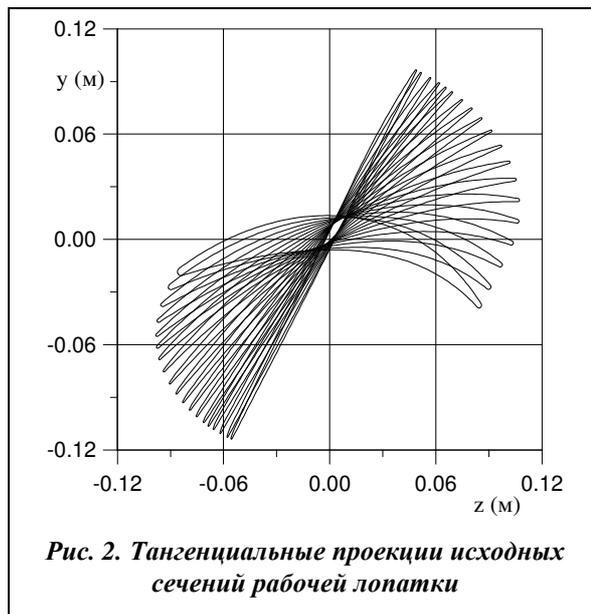
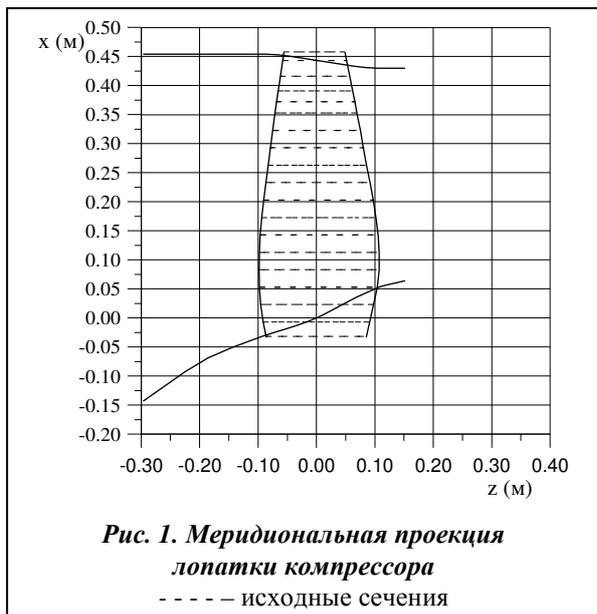
Целью настоящей работы является численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя при гармонических и связанных колебаниях для заданных режимов граничных условий на входе и выходе за венцом с учетом неравномерного распределения давления за лопаточным венцом.

Постановка задачи

Рассматривается обтекание трехмерным потоком вязкого нетеплопроводного газа вращающегося венца вентилятора с колеблющимися лопатками. Лопаточный венец вентилятора представля-

© В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, И. Ф. Кравченко, В. М. Меркулов, А. В. Шереметьев, А. В. Петров, 2017

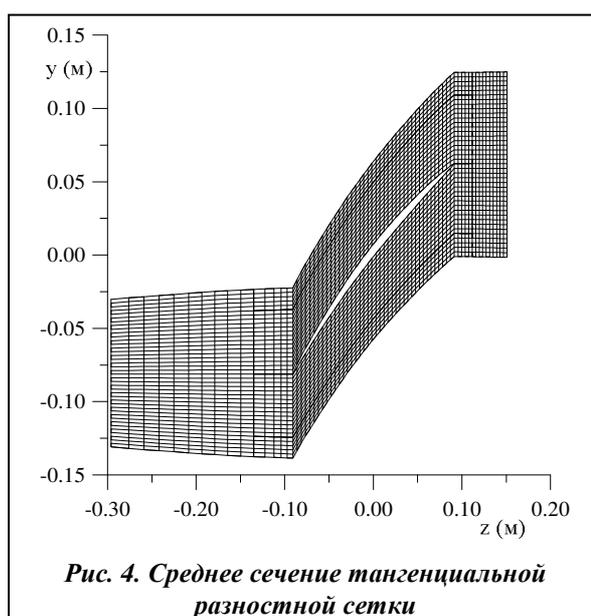
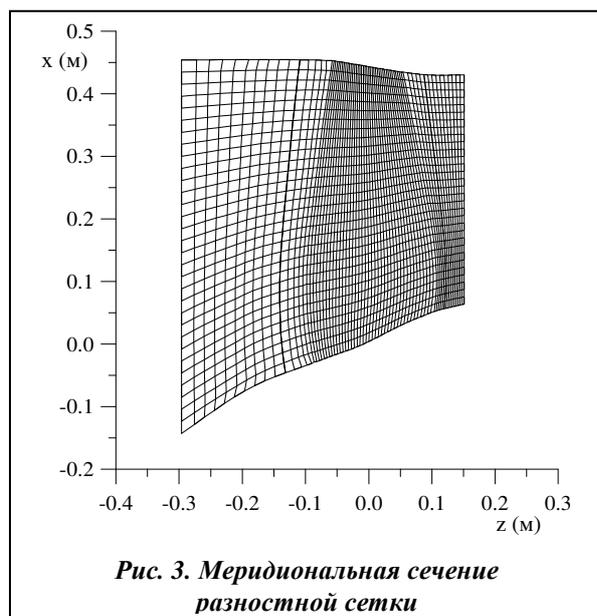
ет собой кольцевую решетку, состоящую из 24 лопаток. Меридиональная проекция проточной части и плоские сечения, формирующие лопатку вентилятора, приведены на рис. 1, 2.



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]. Учитывая неперIODичность потока в окружном направлении (из-за неравномерности статического давления за лопаточным венцом) расчетная область включает полную дугу окружности. Число межлопаточных каналов $N = 24$ и сдвиг по фазе колебаний лопаток δ связаны соотношением $N\delta = 2\pi j$, j – целое число.

Разностная сетка разбивается на N -сегментов, 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.

На рис. 3, 4 приведены фрагменты разностной сетки – меридиональное сечение (рис. 3) и тангенциальное сечение в среднем сечении лопатки (рис. 4). При этом внешняя Н–сетка остается непо-



движной в течение всего расчета, а внутренняя H–сетка перестраивается на каждой итерации так, что ее внешние узлы остаются неподвижными, а внутренние жестко связаны с колеблющейся лопаткой.

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 [7].

Постановка граничных условий основана на одномерной теории характеристик. 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 [3, 4].

Динамическая модель колеблющейся лопатки описывается с использованием модального подхода, что позволяет получить систему независимых дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных форм [3–6]. Правые части этих уравнений представляют собой модальные силы, которые рассчитываются по распределению давления на поверхности лопатки в каждый момент времени.

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

Численный анализ

Численное исследование аэроупругих характеристик лопаточного венца вентилятора проведено для двух режимов при различных значениях МЛФУ (межлопаточный фазовый угол).

Режим 1

В качестве граничных условий 1-го режима приняты:

- давление и температура заторможенного потока перед венцом $P_0 = 100204$ Па; $T_0 = 279,9$ К;
- углы потока в окружном (α) и радиальном (γ) направлениях заданы;
- переменное по радиусу статическое давление за вентилятором (рис. 5);
- скорость вращения лопаточного венца $n = 4800$ об/мин.

На рис. 5 показаны графики изменения по высоте лопатки полного давления на входе P_0 в абсолютной системе координат (кривая 2), полного давления P_{0w} во вращающейся системе координат (кривая 5), статического давления P_2 на выходе за венцом (кривая 3) и полного давления P_{20} за вентилятором в абсолютной системе координат (кривая 4).

В расчетах учитывались первые пять собственных форм, собственные частоты каждой из форм приведены ниже.

Номер собственной формы	1	2	3	4	5
Частота, ν_i , Гц	106	236	411	494	640

Проведены расчеты обтекания лопаточного венца при гармонических колебаниях при межлопаточных углах сдвига по фазе колебаний лопаток МЛФУ = $0^\circ, 180^\circ, \pm 90^\circ$ с учетом взаимодействия пяти собственных форм.

Характер обмена энергией между потоком воздуха и колеблющимися лопатками показан на рис. 6, на котором приведен график влияния межло-

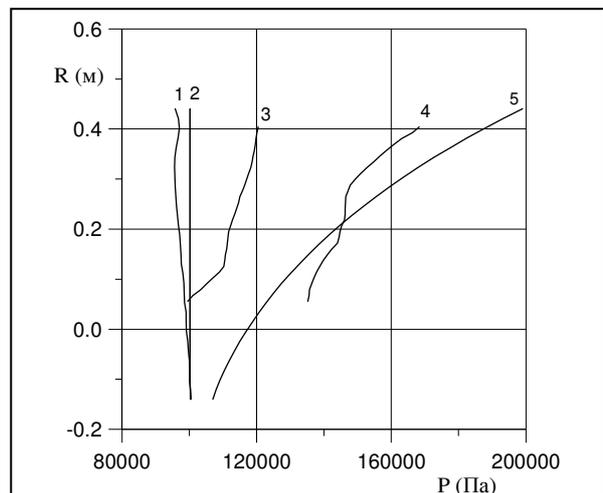


Рис. 5. Распределение по радиусу лопатки полного и статического давления (режим $n = 4800$ об/мин)

- 1 – распределение статического давления на входе в рабочее колесо;
- 2 – распределение P_0 ;
- 3 – распределение P_2 ;
- 4 – распределение P_{20} ;
- 5 – распределение P_{0w}

паточного угла сдвига по фазе колебаний лопаток на осредненный по длине лопатки коэффициент аэродемпфирования, равный взятому со знаком «минус» коэффициенту работы W аэродинамических сил за один период колебаний

$$D = -W = -\int_0^{1/\nu} \vec{F} \cdot \vec{v} dt .$$

Как видно из графика, коэффициент аэродемпфирования $D < 0$ ($W > 0$) для всех значений МЛФУ, что соответствует подводу энергии от потока к лопатке (возбуждение колебаний).

Далее проведен расчет связанных колебаний лопаток. Время одного периода 0,06283 с, частота 15,91 Гц, что соответствует наибольшему общему периоду всех собственных частот.

На рис. 7 приведены графики изменения модального коэффициента 1-й собственной формы с учетом взаимодействия пяти собственных форм (рис. 7, а) и амплитудно-частотная характеристика 1-й формы (рис. 7, б) для МЛФУ = 0°. Как следует из графиков, по 1-й собственной форме происходит возбуждение колебаний, т. е. флаттер, что приводит к росту амплитуд колебаний по всем собственным формам с частотой, близкой к собственной частоте 1-й формы.

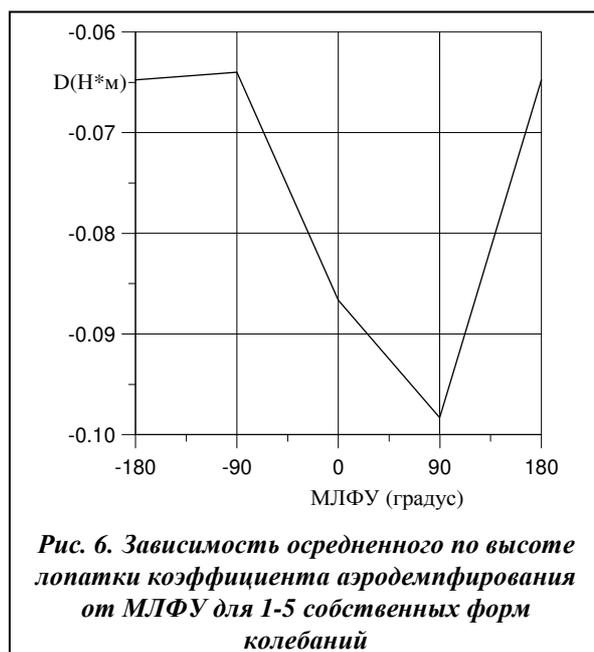


Рис. 6. Зависимость осредненного по высоте лопатки коэффициента аэродемпфирования от МЛФУ для 1-5 собственных форм колебаний

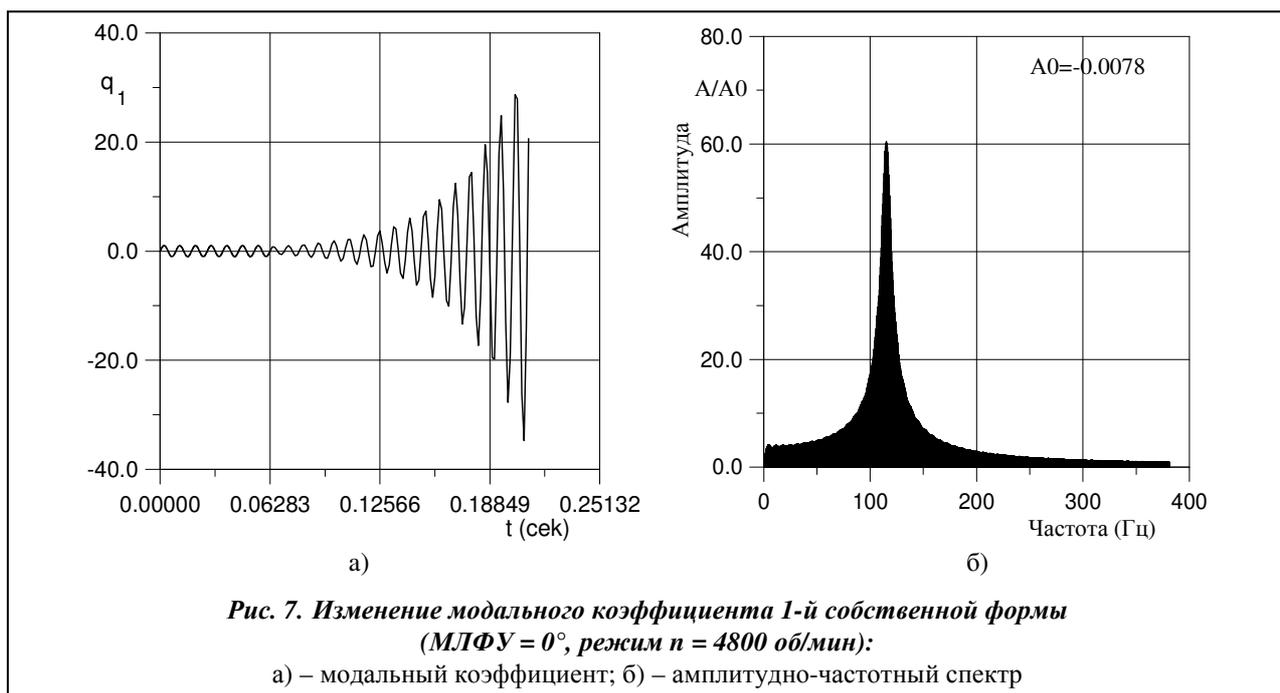
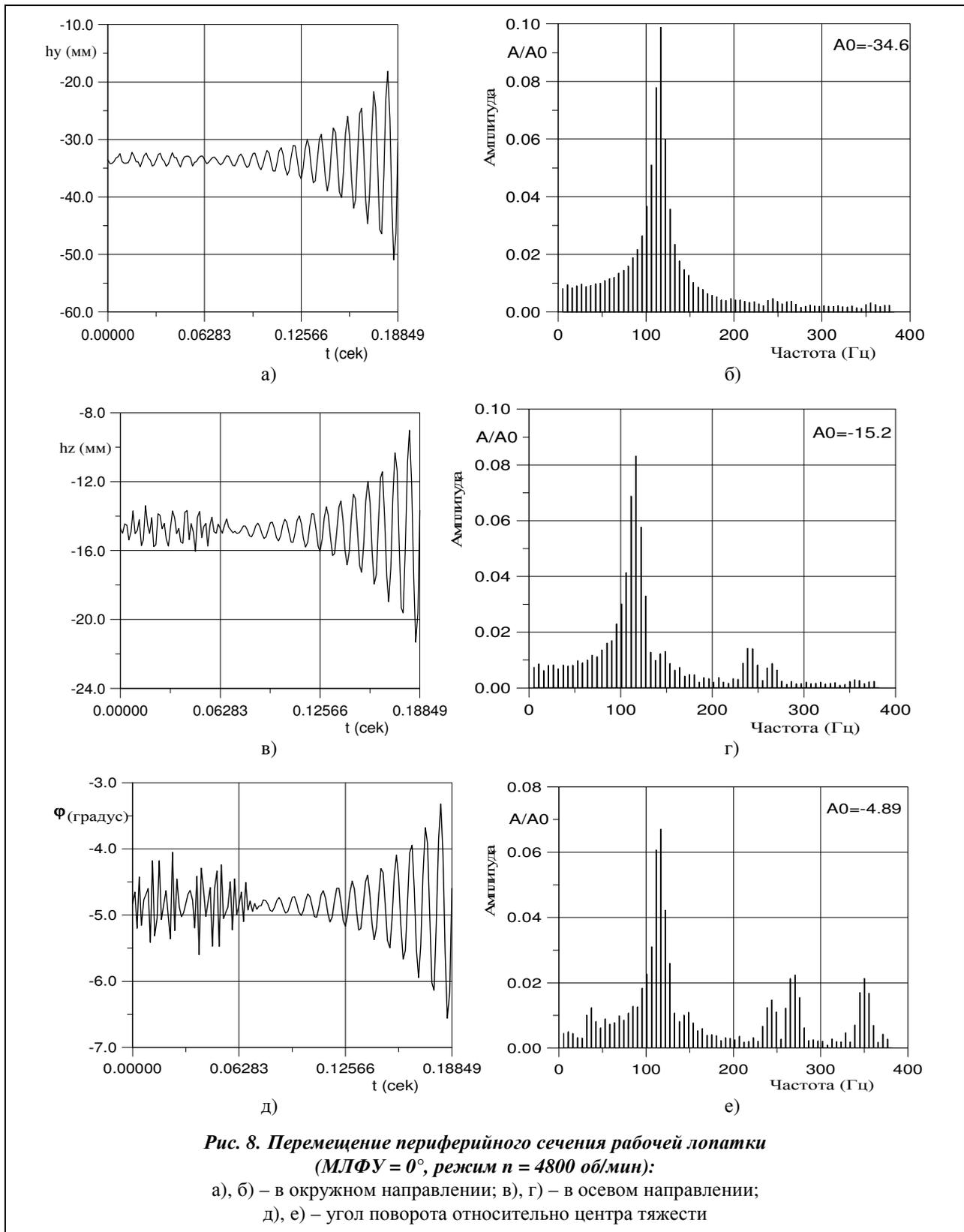


Рис. 7. Изменение модального коэффициента 1-й собственной формы (МЛФУ = 0°, режим n = 4800 об/мин):
а) – модальный коэффициент; б) – амплитудно-частотный спектр

Перемещения периферийного сечения в окружном (h_y), осевом (h_z) направлениях и поворот относительно центра тяжести (φ) для МЛФУ = 0° с учетом взаимодействия пяти форм показаны на рис. 8, а, в, д, их амплитудно-частотные спектры – на рис. 8, б, г, е.

Проведен численный анализ влияния повышения собственной частоты 1-й собственной формы на режим колебаний лопаток при МЛФУ = 0° с учетом взаимодействия пяти собственных форм (собственные частоты 2–5-й форм не изменялись). На рис. 9 приведены графики изменения модального коэффициента 1-й собственной формы при собственных частотах, соответственно равных 106, 126 и 142 Гц. При частоте 126 Гц происходит возбуждение колебаний с амплитудой ниже, чем при

частоте 106 Гц. При частоте 142 Гц происходит аэродемпфирование. Таким образом, повышение аэродинамической устойчивости колебаний лопаточного венца по отношению к флаттеру связано с повышением собственной частоты колебаний, т. е. жесткости лопаток.



Режим 2

Граничные условия для 2-го режима:

- полное давление на входе $P_0 = 90500\text{--}93600$ Па;
- полная температура на входе $T_0 = 291,16$ К;
- углы потока в окружном и радиальном направлениях;
- переменное по радиусу и по окружности статическое давление на выходе за вентилятором (рис. 10, 11);
- скорость вращения лопаточного венца $n = 5810$ об/мин.

На рис. 10 показаны графики изменения по высоте лопатки полного давления на входе P_0 в абсолютной системе координат, статического давления перед венцом P_1 , полного давления P_{0w} во вращающейся системе координат, статического давления P_2 на выходе за венцом и полного давления на выходе за вентилятором в абсолютной системе координат P_{20} .

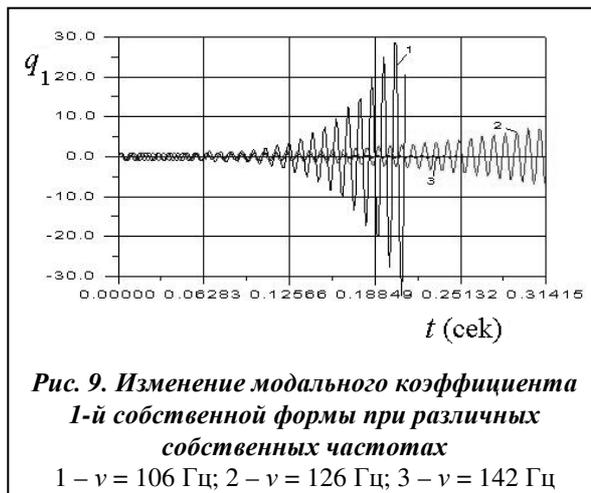


Рис. 9. Изменение модального коэффициента 1-й собственной формы при различных собственных частотах
 1 – $\nu = 106$ Гц; 2 – $\nu = 126$ Гц; 3 – $\nu = 142$ Гц

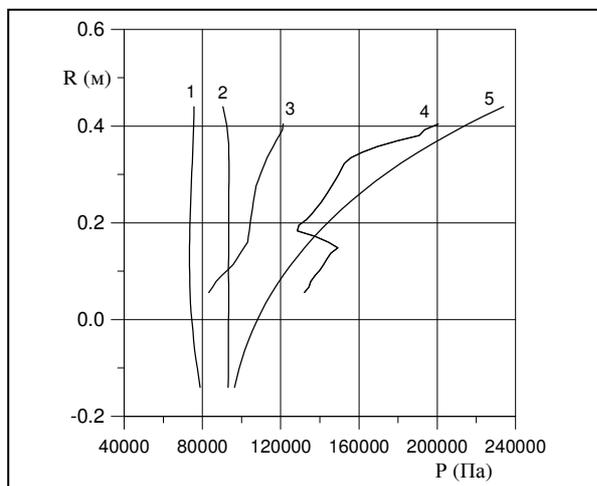


Рис. 10. Распределение по радиусу лопатки полного и статического давления (режим $n = 5810$ об/мин)
 1 – распределение статического давления на входе в рабочее колесо; 2 – распределение P_0 ; 3 – распределение P_2 ; 4 – распределение P_{20} ; 5 – распределение P_{0w}

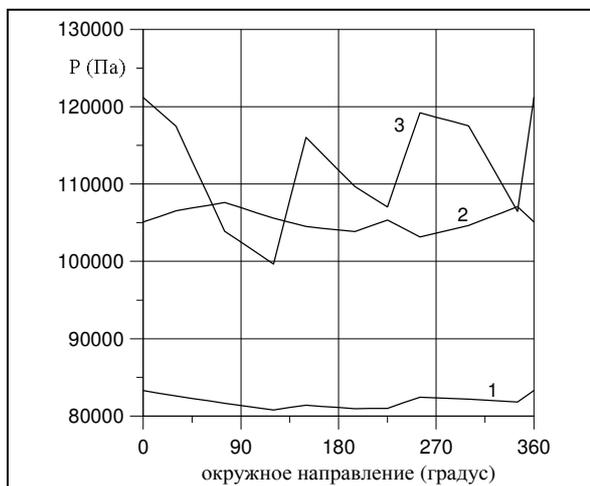


Рис. 11. Распределение статического давления на выходе за вентилятором в окружном направлении:
 1 – в корневом сечении; 2 – в среднем сечении; 3 – в периферийном сечении

На рис. 11 приведены графики изменения статического давления на выходе за вентилятором в окружном направлении в корневом, среднем и в периферийном сечениях.

В расчетах учитывались первые пять собственных форм. Собственные частоты каждой из форм приведены ниже.

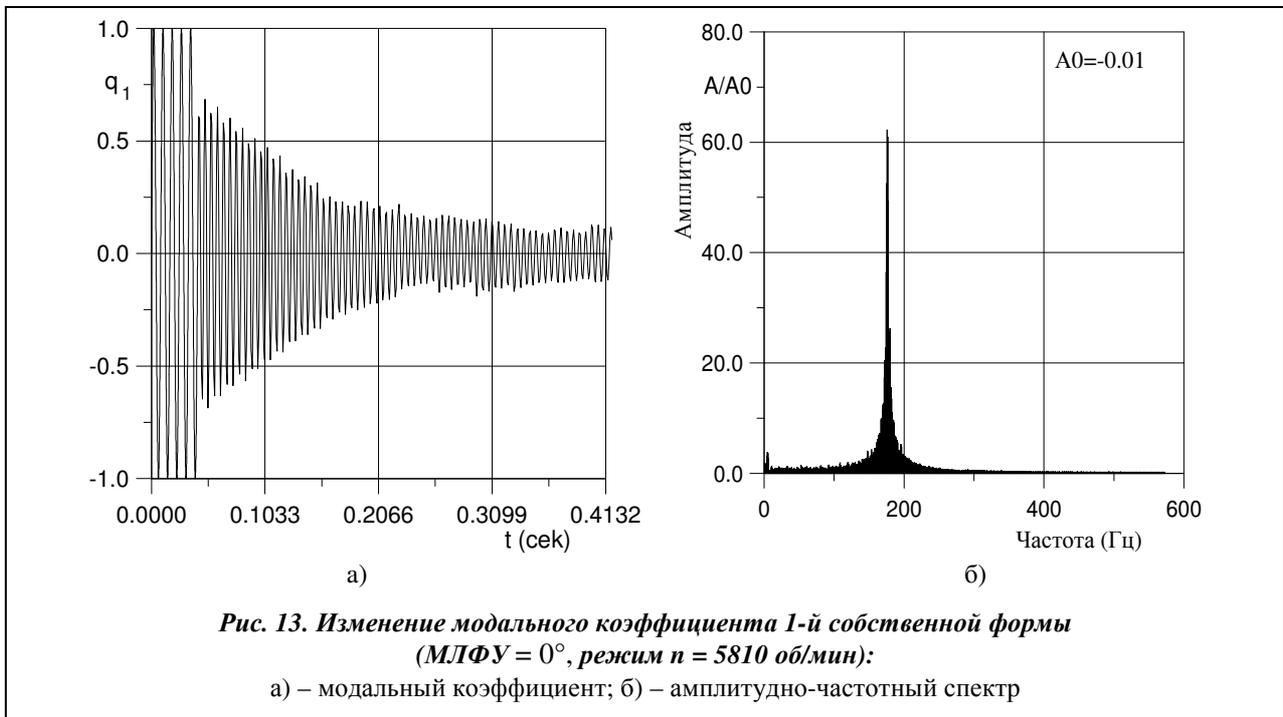
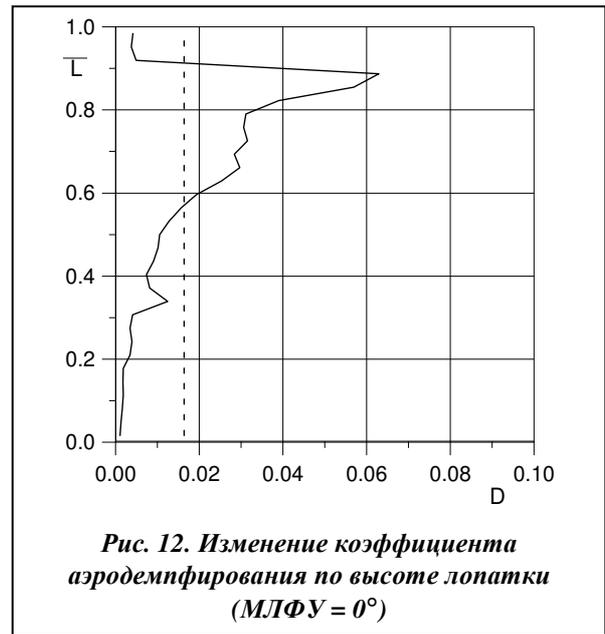
Номер собственной формы	1	2	3	4	5
Частота, ν_i , Гц	119	263	415	524	640

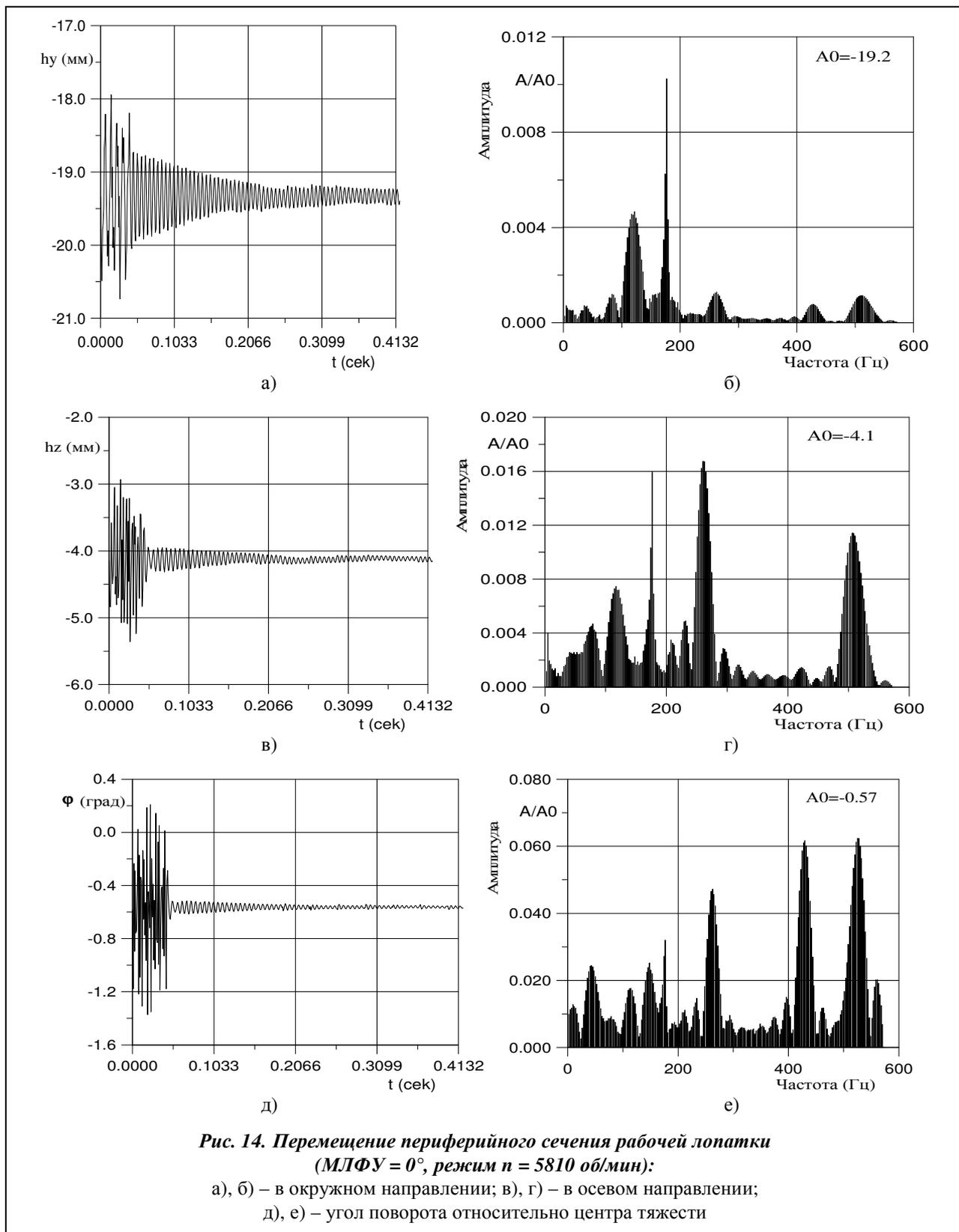
Обмен энергией между потоком воздуха и колеблющимися лопатками при гармонических колебаниях с учетом взаимодействия пяти собственных форм для $MЛФУ = 0^\circ$ характеризуется коэффициентом аэродемпфирования, представленным на рис. 12. Как видно из графика, коэффициент аэродемпфирования $D > 0$ ($W < 0$), что соответствует отводу энергии от лопатки к воздушному потоку (аэродемпфирование колебаний).

На рис. 13 приведены графики изменения во времени модального коэффициента 1-й собственной формы (рис. 13, а) и амплитудно-частотная характеристика (рис. 13, б) с учетом взаимодействия пяти собственных форм в течение 40 оборотов ротора (частота вращения ротора 96,83 Гц, время 1-го оборота 0,01033 с). На графике представлен один период гармонических колебаний ($t = 0 \div 0,0419$ с) и связанные колебания. Как следует из графика, по 1-й собственной форме происходит аэродемпфирование колебаний и переход к режиму устойчивых колебаний с частотой, близкой к собственной частоте 1-й формы. По 2-й-5-й собственным формам происходит затухание колебаний.

На рис. 14 приведены графики колебаний периферийного сечения лопатки в окружном направлении h_y (рис. 14, а), осевом направлении h_z (рис. 14, в) и поворот относительно центра тяжести φ (рис. 14, д), а также амплитудно-частотные характеристики (рис. 14, б, г, е) с учетом взаимодействия пяти форм колебаний.

Таким образом, во 2-м режиме работы вентилятора ($n = 5810$ об/мин) лопатки совершают устойчивые колебания с амплитудой колебаний для верхнего сечения лопатки в окружном направлении $\sim 0,125$ мм, в осевом направлении $\sim 0,05$ мм, угол поворота $\sim 0,04^\circ$.





Выводы

1. Разработанный метод решения связанной задачи нестационарной газодинамики и упругих колебаний лопаток существенно отличается от традиционного метода расчета вынужденных колебаний, так как позволяет рассчитывать самовозбуждающиеся колебания, включая вынужденные колебания, вызванные взаимным обменом энергией между нестационарным потоком газа и колеблющимися лопатками.

2. Проведен численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца вентилятора для двух режимов эксплуатации.

3. При 1-м режиме эксплуатации ($n = 4800$ об/мин) происходит самовозбуждение колебаний, т. е. флаттер по 1-й собственной форме, что приводит к росту амплитуд колебаний по всем собственным формам с частотой, близкой к собственной частоте 1-й формы.

4. Повышение аэроупругой устойчивости для заданного режима обтекания связано с повышением жесткости лопаток.

5. При 2-м режиме эксплуатации ($n = 5810$ об/мин) происходит аэродемпфирование и переход к устойчивым колебаниям лопаток с минимальной амплитудой колебаний.

Литература

1. Bolcs, A. Aeroelasticity in turbomachines. Comparison of theoretical and experimental cascade results / A. Bolcs, T. Fransson // *Communication de Laboratoire de Thermique Appliquée de Turbomachines*. – 1986. – № 13. – 174 p.
2. Cinnella, P. A numerical method for turbomachinery aeroelasticity / P. Cinnella, P. De Palma, G. Pascazio, M. Napolitano // *J. Turbomachinery*. – 2004. – Vol. 126. – P. 310–316.
3. Гнесин, В. И. Анализ аэроупругости лопаточного венца турбомашин на основе численного решения связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // *Пробл. машиностроения*. – 1998. – Т. 1, № 3–4. – С. 29–40.
4. Гнесин, В. И. Численное моделирование аэроупругого состояния вибрирующего лопаточного венца турбомашин в трехмерном трансзвуковом потоке невязкого газа / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная // *Пробл. машиностроения*. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 65–76.
5. Gnesin, V. I. A numerical modeling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades / V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya, R. Rzadkowski // *J. Fluids and Structures*. – 2004. – № 19. – P. 1141–1153.
6. 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 // *Вестн. НТУ ХПИ. Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование*. – 2009. – № 3. – С. 23–32.
7. *Численное решение многомерных задач газовой динамики* / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Поступила в редакцию 14.04.17