

УДК 621.378:535

Р.Х. МАКАЕВА, А.Х. КАРИМОВ, А.М. ЦАРЕВА, Э.М. ФАТЫХОВА

*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева (КГТУ-КАИ)***ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Приведены результаты экспериментальных и численных исследований резонансных частот и форм колебаний прямоугольных консольно закреплённых пластин постоянной толщины и лопаток компрессора ГТД методами голографической интерферометрии и конечных элементов. Выявлены закономерности последовательности появления резонансных форм колебаний. Составлены систематизированные таблицы резонансных форм колебаний пластин, которые служат ориентиром при исследовании колебаний реальных лопаток. Предложен способ определения пропущенных гармоник. Результаты исследований применены при решении практических задач.

Ключевые слова: лопатки компрессора, прямоугольные пластины, колебания, резонансные частоты и формы, голографическая интерферометрия.

В процессе эксплуатации авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) работают при значительных динамических нагрузках. Наиболее вибронегруженными являются лопатки и рабочие колёса. Известно, что более 50% отказов двигателей происходит из-за резонансных разрушений деталей [1]. Поэтому важной задачей является отстройка от резонанса. С этой целью определяют вибрационные характеристики – собственные частоты и формы колебаний наиболее ответственных деталей. Диагностика лопаток турбомашин по вибрационным характеристикам позволяет установить причины их разрушения в условиях эксплуатации.

Объектами исследования были выбраны рабочие лопатки 5 ступени компрессора авиационного ГТД. Материал лопатки – титановый сплав ВТ-8, длина пера $l = 110...120$ мм, ширина $b = 50...55$ мм, толщина $h = 1...2$ мм.

Реальные лопатки имеют сложную геометрию. Поэтому картины узловых линий форм резонансных колебаний также получаются достаточно сложными и выявить какие-либо классические закономерности практически трудно.

В документации, сопровождающей ГТД, обычно приводятся 5...8 гармоник колебаний лопаток. Однако достоверное подтверждение последовательности появления форм колебаний отсутствует, и не рассматриваются способы, позволяющие установить пропущенные формы колебаний.

Поэтому до исследований резонансных форм колебаний реальных лопаток появилась необходимость изучения резонансных форм колебаний геометрически правильных прототипов лопаток – прямоугольных пластин.

Проводились экспериментальные и численные исследования вибрационных характеристик прямоугольных консольно закреплённых пластин постоянной толщины методами голографической интерферометрии и конечных элементов. Для исследования были выбраны пластины толщиной $h = 1...3$ мм, шириной $b = 20, 30, 40$ и 60 мм, длиной l от 20 до 200 мм, изготовленные из стали 12Х18Н10Т, алюминиевого сплава Д16Т, титанового сплава ОТ4-1 и никельхромового сплава ХН77ТЮР (ЭИ437Б).

Экспериментальные исследования выполнялись на голографической установке, описанной в работе [2]. Для получения более полного спектра резонансных форм и частот колебаний использовались различные способы консольного крепления пластин и фиксирования резонансных частот. Голографические интерферограммы регистрировались методом усреднения по времени.

На рис. 1 приведены полученные методом голографической интерферометрии резонансные формы колебаний прямоугольной консольно закреплённой пластины. Для каждой формы даны её обозначение F_{bl} , порядковый номер появления и резонансная частота.

Так, например, в верхней строке после формы колебаний F_{10} с одной изгибной узловой линией вдоль ширины в месте закрепления (индексы $b = 1$ и $l = 0$) последовательно располагаются формы колебаний с одной, двумя, тремя и четырьмя узловыми линиями ($l = 1, 2, 3, 4$) крутильных колебаний, направленных вдоль длины пластинки, т. е. $F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}$. Аналогичная последовательность характерна для второй и последующих строк.

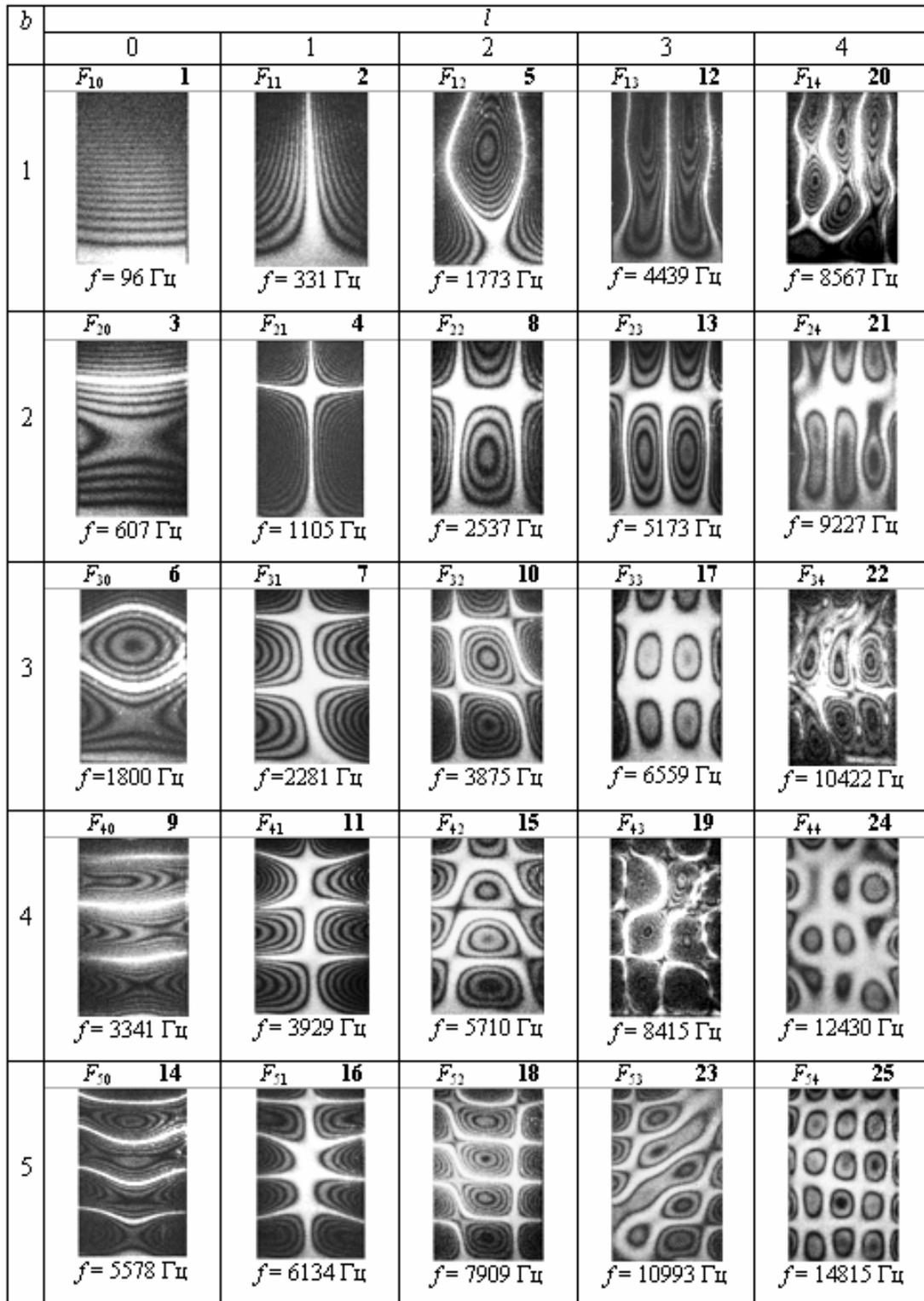


Рис. 1. Систематизированный по числам *b* и *l* спектр резонансных форм и частот колебаний прямоугольной консольно закреплённой пластины постоянной толщины размерами $l = 90$ мм, $b = 60$ мм, $h = 1$ мм из стали 12X18H10T, полученный экспериментально

Установлено, что последовательность появления форм колебаний зависит от соотношения длины и ширины пластин. Формы резонансных колебаний пластин были получены также и расчётным путём с применением метода конечных элементов.

Таблицы форм резонансных колебаний прямоугольных пластин могут служить базовыми ориентирами при определении резонансных форм колебаний реальных лопаток ГТД и последовательности их появления. По данным таблицы были построены гра-

фические зависимости резонансных частот от числа узловых линий l и b . Такие графики позволяют определить резонансные частоты пропущенных гармоник.

Были проведены исследования резонансных частот и форм колебаний лопаток 5 ступени компрессора ГТД с применением метода голографической интерферометрии.

Полученные формы колебаний лопатки сведены в систематизированную таблицу (рис. 2). Как показывает сравнение, формы колебаний лопатки и

прямоугольной пластины идентичны, что позволяет точно определить форму колебаний реальной лопатки. Искривление узловых линий объясняется закруткой и переменностью сечения пера лопатки.

После сведения полученных форм колебаний лопатки в систематизированную таблицу и сравнения её с базовой таблицей для прямоугольных пластин установлено, что первоначально была пропущена резонансная форма F_{42} колебаний с четырьмя изгибными и двумя крутильными узловыми линиями.

b	l			
	0	1	2	3
1	F_{10} 1 $f = 424$ Гц	F_{11} 2 $f = 1663$ Гц	F_{12} 6 $f = 4525$ Гц	F_{13} 11 $f = 8744$ Гц
	F_{20} 3 $f = 1890$ Гц	F_{21} 4 $f = 2980$ Гц	F_{22} 9 $f = 6750$ Гц	F_{23} 14 $f = 12675$ Гц
	F_{30} 5 $f = 3685$ Гц	F_{31} 7 $f = 5370$ Гц	F_{32} 12 $f = 9277$ Гц	F_{33} 15 $f = 16175$ Гц
	F_{40} 8 $f = 5771$ Гц	F_{41} 10 $f = 6983$ Гц	F_{42} 13 $f = 11030$ Гц	F_{43} 16 $f = 19105$ Гц

Рис. 2. Систематизированная таблица спектра резонансных форм колебаний лопатки компрессора 5 ступени ГТД

Построенные графические зависимости резонансных частот f от числа узловых линий l и b лопатки и их аппроксимирующие формулы позволили определить резонансную частоту пропущенной гармоники. Впоследствии эта гармоника была получена экспериментально. По результатам экспериментальных исследований определены значения частотных коэффициентов [3] для предварительного расчёта резонансных частот. Исследования резонансных форм и частот колебаний лопаток с применением голографической интерферометрии позволили решить практические задачи по выявлению причин разрушения уголков лопаток компрессора в процессе эксплуатации, по влиянию перегрева на резонансные частоты и формы колебания лопаток турбины ГТД.

Литература

1. *Диагностика авиационных двигателей* / В.Н. Лозовский, Г.В. Бондал, А.О. Каксис, А.Е. Колтунов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
2. Макаева Р.Х. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева // *Изв. вузов. Авиационная техника*. – 2007. – № 1. – С. 78-80.
3. Макаева Р.Х. Голографическая интерферометрия для исследования собственных форм колебаний прямоугольных консольных пластин / Р.Х. Макаева, А.М. Царева, А.Х. Каримов // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. – 2008. – № 3. – С. 49-51.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., Ю.Г. Коноплёв, заведующий кафедрой механики Казанского (Приволжского) федерального университета.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ І ФОРМ КОЛИВАНЬ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Р.Х. Макаєва, А.Х. Карімов, А.М. Царева, Е.М. Фатихова

Приведені результати експериментальних і чисельних досліджень резонансних частот і форм коливань прямокутних консольно закріплених пластин постійної товщини і лопаток компрессора ГТД методами голографічної інтерферометрії і кінцевих елементів. Виявлені закономірності послідовності появи резонансних форм коливань. Складені систематизовані таблиці резонансних форм коливань пластин, які служать орієнтиром при дослідженні коливань реальних лопаток. Запропонований спосіб визначення пропущених гармонік. Результати досліджень застосовані при вирішенні практичних завдань.

Ключові слова: лопатки компрессора, прямокутні пластини, коливання, резонансні частоти і форми, голографічна інтерферометрія.

INVESTIGATION OF RESONANCE FREQUENCIES AND OSCILLATION MODES IN GTE COMPRESSOR BLADES WITH USE OF THE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

R.Kh. Makayeva, A.Kh. Karimov, A.M. Tzareva, E.M. Fatihova

The results of experimental and numerical investigations of resonance variation frequencies and modes for rectangular cantilever plates of constant thickness and GTE compressor blades are presents. The investigations are carried out using the methods of holographic interferometry and finite elements. The table of resonance oscillation modes may serve as reference in determining resonance variation frequencies and modes of real blades. The results of investigations were applied at decision of practical problems.

Key words: compressor blades, rectangular plates, vibration, resonance frequencies and oscillation modes, holographic interferometry.

Макаєва Розалія Хабибулловна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри технічної фізики, Казанський державний технічний університет ім. А.Н. Туполева, Казань, Російська Федерація, e-mail: Roskh2001@mail.ru.

Каримов Альберт Хамзович – д-р техн. наук, проф., професор кафедри технічної фізики, Казанський державний технічний університет ім. А.Н. Туполева, Казань, Російська Федерація, e-mail: Roskh2001@mail.ru.

Царева Альбіна Маратовна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедри технічної фізики, Казанський державний технічний університет ім. А.Н. Туполева, Казань, Російська Федерація, e-mail: albinatzareva@mail.ru.

Фатихова Эльмира Мансуровна – соискатель кафедри технічної фізики, Казанський державний технічний університет ім. А.Н. Туполева, Казань, Російська Федерація, e-mail: 709617@mail.ru.