

УДК 621.438

Д. В. ДОВГАНЬ<sup>1</sup>, И. Ю. ЖУК<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*<sup>2</sup> *Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Украина*

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЖАТИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД НА ЧАСТОТУ ИХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Исследовано влияние усилия зажатия в замке компрессорной и турбинной лопаток ГТД на собственные частоты и формы колебаний методом электронной спекл-интерферометрии (ESPI). Представлены зависимости наиболее опасных низших резонансных частот от усилия зажатия в замке. Показано, что наиболее сильно усилие зажатия влияет на первую изгибную форму колебаний. Применительно к рабочей лопатке компрессора ( $l=54$  мм) относительное изменение частоты составляет 0,88..1 в диапазоне усилия зажатия 2,6..4,2 МПа. Для турбинной лопатки ( $l=58$  мм) – 0,87..1 в диапазоне усилия зажатия 1..4,6 МПа.*

**Ключевые слова:** рабочая лопатка ГТД, собственные частоты и формы колебаний, замок, усилие зажатия, спекл-интерферометрия.

### Постановка проблемы

Для решения задач определения динамических параметров рабочих лопаток эффективно используются современные расчётные методики и компьютерные программы ANSYS и MATLAB. При расчётах принимается допущение, что хвостовик лопатки жёстко закреплён. Но для коротких лопаток, когда жёсткость профильной части и замка соизмеримы, в колебаниях участвует не только перо лопатки, но и некоторая её часть, находящаяся в замке. Математическое моделирование граничных условий (в виде жёсткой заделки) приводит к существенным погрешностям. Усилие зажатия лопатки в диске существенно влияет на частоты и формы собственных колебаний, что особенно сказывается на их низших формах [2].

Как показывают лабораторные исследования, экспериментальная частота длинных лопаток совпадает с расчётной, начиная с определённой силы зажатия хвостовика лопатки. Поэтому, при проведении стендовых экспериментальных исследований динамических параметров лопаток ГТД целесообразно определить влияние усилия зажатия хвостовика на спектр собственных частот и форм колебаний. Это позволит более точно оценить опасность возникновения резонансной вибрации лопатки на различных режимах работы двигателя.

Приближённые зависимости этой силы зажатия от частоты вращения диска можно вычислить по формулам [1]:

$$\text{Замок ёлочного типа } P = \frac{F}{2n \cdot \cos \alpha}$$

$$\text{Замок типа ласточкин хвост } P = \frac{F}{2 \sin \beta},$$

где  $F$  – центробежная сила ( $F = m\omega^2 R$ );

$\alpha$  – угол между рабочей гранью зуба и направлением перпендикулярным к оси замка;

$\beta$  – угол между рабочей гранью и осью замка;

$n$  – число пар зубьев.

### Экспериментальная часть

Одним из эффективных экспериментальных методов решения задачи определения собственных частот и форм колебаний являются методы голографической и спекл-интерферометрии. Главным их достоинством является возможность бесконтактного получения информации о вибрационном состоянии всей поверхности исследуемого объекта. Последнее десятилетие цифровая спекл-интерферометрия активно вытесняет аналоговую голографию. Что вызвано относительной простотой реализации, высокой точностью измерений, невысокими требованиями к когерентности источников излучения, механической стабильностью установки [3, 4].

Объектом исследования были выбраны рабочие лопатки компрессора и турбины ГТД с характеристиками, представленными в табл. 1 (рис. 1). Определение собственных частот и форм колебаний осуществлялось методом корреляционной спекл-интерферометрии путём определения контрастности мерцающих спеклов на изображении вибрирующей лопатки [3]. Оптическая схема и аппаратное обеспечение испытательного стенда представлены на рис. 2.

Таблица 1

Характеристики исследуемых лопаток

№	Тип	Тип зажима	Высота, мм	Хорда, мм	Площадь корневого сечения, мм <sup>2</sup>	Относительная толщина	Относительная стрелка прогиба	Угол закрутки периферийного сечения	Материал лопатки
1	Компрессорная	Ласточкин хвост	54	37	136,2	0,1	0,075	17	ВТЗ-1 (ГОСТ 26492)
2	Турбинная, охлаждаемая	Ёлочный	58	33	281,5	0,27	0,227	20	ХН58КВТЮМБЛ-ВИ (ЧС70-ВИ) ТУ 14-1-3658-83



Рис. 1. Объект исследования

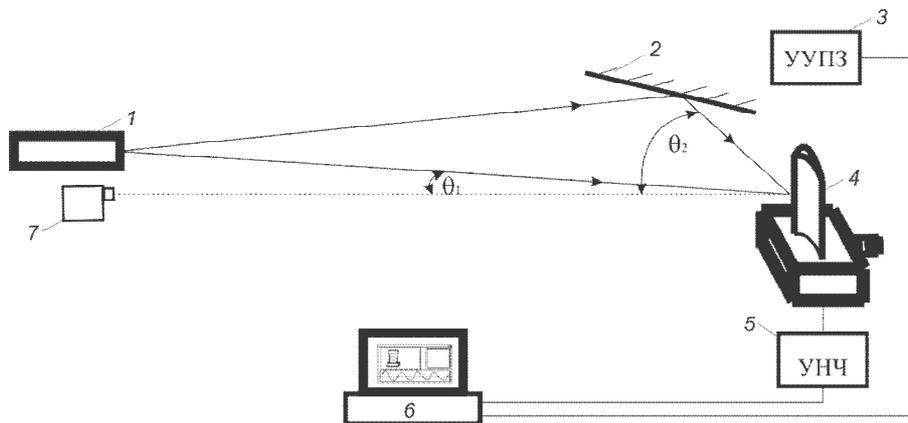


Рис. 2. Оптическая схема установки:

1 – лазер, 2 – зеркало, 3 – устройство управления подвижным зеркалом, 4 – лопатка, 5 – усилитель низкой частоты, 6 – ПЭВМ, 7 – камера

Лопатка 4 установлена в зажимном устройстве с вмонтированным в неё пьезовибровозбудителем. В качестве источника света служит лазер 1 (ЛГН-215) мощностью излучения 50 мВт,  $\lambda=0,568$  мкм и длиной когерентности порядка 20 см. Расширенный расходящийся световой пучок делится по фронту. Первая его часть освещает лопатку под некоторым углом  $\theta_1$  к направлению наблюдения. Вторая часть излучения попадает на вибрирующее с малой амплитудой ( $\pm\lambda$ ) и частотой (3..5 Гц) зеркало 2 и освещает лопатку под углом  $\theta_2$ . Таким образом, на светочувствительной матрице видеокамеры 7 возникает поле мерцающих с низкой частотой спеклов. При

возбуждении резонансных колебаний лопатки происходит изменение контраста спеклов в соответствии с возникшей колебательной формой. Определение распределения функции контраста и соответствующей формы колебаний производится специализированной компьютерной программой, разработанной авторами.

Целесообразность применения созданной оптической схемы состоит в простоте её реализации и, что важно, в пониженной чувствительности к нормальной компоненте колебаний [4]. Формирование интерференционной картины, отображающей перемещение  $d$  точек поверхности лопатки, происходит в соответствии с формулой:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2),$$

где  $\Delta\varphi$  – изменение фазы светового луча, соответствующее данному перемещению;

$\theta_1, \theta_2$  – углы между направлением наблюдения и направлениями двух освещающих лопатку световых пучков.

При расходящихся освещающих пучках  $\theta_1$  и  $\theta_2$  для разных точек лопатки будут разными. Но если размеры лопатки малы по сравнению с расстоянием до освещающего источника, то этот эффект практически не вносит искажений в интерферограмму формы колебаний. Если разность  $(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$  сделать малой, то чувствительность интерферометра становится низкой и позволяет исследовать колебания с амплитудой по нормали к поверхности в 10-15 мкм. В данных исследованиях это важно, т.к. при малой силе зажатия по мере увеличения амплитуды проявляющийся эффект смещения хвостовика относительно паза диска сказывается как на значении резонансной частоты, так и на форме колебаний.

Момент зажатия прижимного устройства контролировался ключом Intertool XT-9006 ( $M=28\dots 210$  Н·м). Сила зажатия ( $P, \tau$ ) в рабочем диапазоне динамометрического ключа определяется

зависимостью  $P = 0,4479 M + 3,01$ , где  $M$  – крутящий момент винта, Н·м.

Исследованы наиболее опасные формы колебаний: 1-я изгибная, 1-я крутильная, 2-я изгибная, 2-я крутильная и пластинчатая формы колебаний. Изменение частоты и формы колебаний компрессорной лопатки в зависимости от усилия зажатия показано на рис. 3. Для первой изгибной формы усилия зажатия практически не влияет на форму колебаний, частота при этом изменяется как показано на рис. 4 а. В условиях эксперимента для первой крутильной и второй изгибной форм колебаний положение узловых линий несколько менялось, становясь более выраженной при увеличении усилия зажатия.

Зависимости собственных частот лопаток (в относительном виде) от величины усилия зажатия (рис. 4) показывают, что начиная, примерно, от 4,0 МПа собственная частота их колебаний не меняется.

При этом максимальные собственные частоты колебаний компрессорной лопатки составляют 1400, 4120, 6300 для первой изгибной, первой крутильной и второй изгибной форм соответственно. Для турбинной лопатки усилия зажатия, начиная с которого собственная частота не изменяется, составило 4,5 МПа. При этом максимальные собственные частоты колебаний составляют 2500, 7560, 10000 для

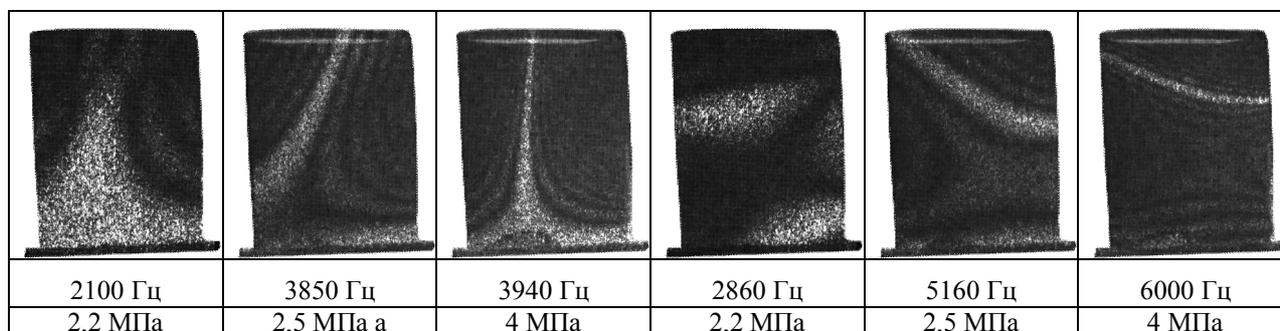


Рис. 3. Формы колебаний компрессорной лопатки при различных усилиях зажатия

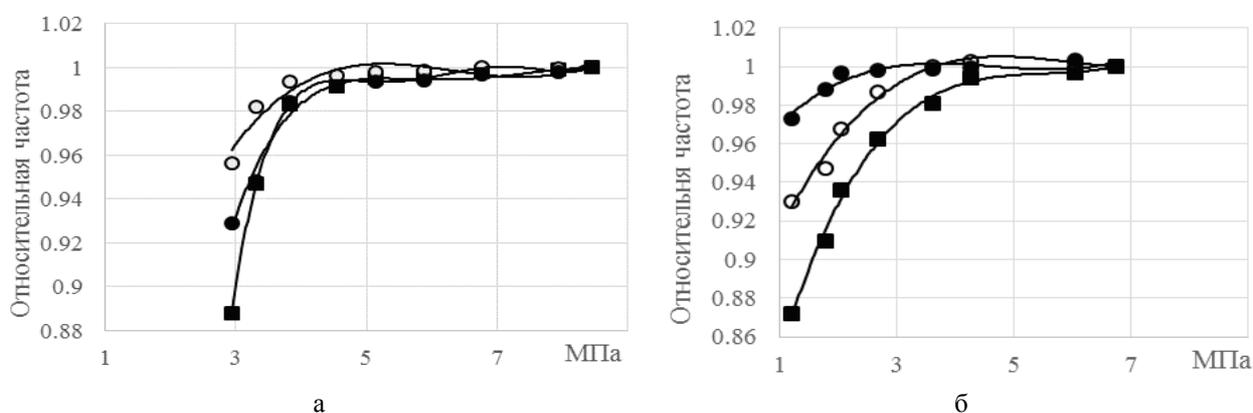


Рис. 4. Зависимость частоты от силы зажатия:

а – компрессорная лопатка; б – турбинная лопатка ■ – 1-я изгибная ○ – 1-я крутильная ● – 2-я изгибная

первой изгибной, первой крутильной и второй изгибной форм соответственно. В качестве базового значения для каждой формы приняты максимальные величины собственных частот колебаний. Это примерно соответствует частоте 3200..3600 об/мин для компрессорной лопатки и 3800..4100 об/мин для турбинной лопатки.

Наиболее сильно подвержены влиянию усилия зажатия замка первая крутильная и первая изгибная формы. Кроме того, выявлено, что при малых усилиях зажатия лопатки проявляется эффект слоения низших форм (возникновение дублей), когда одной и той же форме соответствуют 2-3 значения отличающихся друг от друга резонансных частот в пределах 1..5%.

### Выводы

1. На базе разработанного стенда определены собственные частоты и формы колебаний компрессорной (высота 54 мм, хорда 37 мм) и турбинной охлаждаемой (высота 58 мм, хорда 33 мм) лопаток ГТД в диапазоне частот 0,5..20 кГц.

2. Выявлена зависимость силы зажатия лопатки ГТД на частоту собственных колебаний, и показано, что наиболее сильно подвержена влиянию усилия в замке зажатия первая изгибная форма колебаний.

3. Применительно к компрессорной лопатке относительное изменение частоты составляет 0,88..1 в диапазоне усилия зажатия 2,6..4,2 МПа. Для турбинной лопатки 0,87..1 в диапазоне 1..4,6 МПа.

### Литература

1. Биргер, И. А. *Расчёт на прочность деталей машин [Текст]* / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, И. О. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Скубачевский, Г. С. *Авиационные газотурбинные двигатели [Текст]* / Г. С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.
3. *Определение форм собственных колебаний элементов ГТД в реальном времени методом электронной спекл-интерферометрии [Текст]* / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотой, Д. В. Довгань, И. Ю. Жук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 8(85). – С. 203-207.
4. *Оперативное определение динамических характеристик лопаток ГТД на базе спекл-интерферометрии [Текст]* / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотой, И. Ю. Жук, Д. В. Довгань // *Газотурбинные технологии*. – 2013. – № 1. – С. 30-34.
5. Jones, R. *Holographic and Speckle Interferometry [Text]* / R. Jones, C. Wykes. – 2 edition. – Cambridge University Press, 1989. – 386 p.

*Поступила в редакцию 6.06.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М. Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев.

### ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ ЗАТИСНЕННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД НА ЧАСТОТУ ЇХ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ

*Д. В. Довгань, І. Ю. Жук*

Проведено експериментальне дослідження впливу сили затиснення лопаток ГТД в замку на власні частоти і форми коливань методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI). Представлено залежності нижчих резонансних частот від зусилля затиснення в замку до 7 МПа. Показано, що найбільш схильна до впливу сили затиснення 1-я згинна форма коливань і для компрессорної лопатки значення частоти складає 0,88..1 в діапазоні сили затиснення 2,6..4,2 МПа. Для турбінної 0,87..1 в діапазоні 1..4,6 МПа.

**Ключові слова:** лопатка ГТД, спекл-інтерферометрія, власні частоти і форми коливань, замок, зусилля затиснення.

### EFFECT OF RETAINING PRESSURE TO THE NATURAL FREQUENCIES OF GTE BLADES

*D. V. Dovgan, I. Y. Guk*

An experimental study of the effect of retaining pressure to the natural frequencies of GTE blades using method of electronic speckle interferometry (ESPI) was provided. The dependence of the resonance frequencies and retaining pressure in the blade locking piece in range 1..7 MPa was shown. It was shown that most strongly influenced mode by retaining pressure is 1st vibration mode and compressor blade frequency changed in the of 0.88..1 in the range 2.6..4.2 MPa of retaining pressure. And for turbine 0.87..1 in the range 1..4.6 MPa.

**Keywords:** GTE blade, speckle interferometry, the natural frequencies, retaining pressure.

**Довгань Дмитрій Витальевич** – аспірант, Національний університет кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: dmytro.dovgan@nuos.edu.ua.

**Жук Ірина Юрьевна** – ст. преподаватель, Черноморський державний університет ім. Петра Могили, Николаєв, Україна, e-mail: goldspekl@ukr.net.