

УДК 629.7.036:539.4

**А.В. ПЕТРОВ, В.В. ТИХОМИРОВ, В.В. ДОНЧЕНКО**

*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

## **ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ГТД**

*Определены основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на точность расчетов собственных частот и форм колебаний рабочих лопаток компрессоров ГТД. Проведен расчетно-экспериментальный анализ влияния вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний лопаток в зависимости от масштабного фактора и типа замкового соединения. Рассмотрены лопатки с замковыми соединениями трех типов – «двузубая елка», «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа. Выполнена статистическая обработка результатов. Даны практические рекомендации по рациональному выбору граничных условий при проектировании лопаток с замковыми соединениями исследованных типов и масштабных групп.*

**Ключевые слова:** рабочие лопатки компрессора, расчетно-экспериментальный анализ, собственная частота, форма колебаний, граничные условия, масштабный фактор, тип замкового соединения, ГТД.

### **Введение**

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) широко используется для расчета статической и динамической прочности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) [1-3]. В частности, применение МКЭ позволяет с достаточной для практики точностью получать расчетные распределения статических и динамических напряжений, деформаций, перемещений, а также частот и форм собственных колебаний с учетом особенностей геометрии деталей и реальной концентрации напряжений [3]. Однако применение конечноэлементных моделей требует их адаптации к конкретным инженерным задачам. Применительно к лопаткам ГТД данная адаптация включает в себя рациональный выбор следующих параметров [4,5]:

- типа и формы конечных элементов;
- степени густоты конечноэлементной сетки;
- модели материала;
- модели нагружения;
- граничных условий.

Перечисленные выше факторы в различной степени влияют на точность получаемых результатов МКЭ, в частности вид накладываемых граничных условий может существенным образом оказывать влияние на спектр собственных частот и форм колебаний лопаток ГТД (значительное отличие собственных частот колебаний по одной форме, появление дополнительных форм колебаний и др.) [4,5].

Знание точных расчетных значений собственных частот лопаток ГТД необходимо для их отстройки от опасных резонансов при проектировании.

### **1. Постановка задачи исследования**

Отстройка рабочих лопаток компрессоров ГТД от опасных резонансов на этапе проектирования является необходимым условием обеспечения их надежной работы [1, 2]. Для этого выполняются серии расчетов собственных частот и форм колебаний лопаток с различной геометрией и граничными условиями с целью получения необходимых запасов от резонансов с гармониками возбуждения, по которым может иметь место повышенный уровень динамических напряжений в эксплуатации. Следовательно, повышение точности и достоверности расчетного определения спектра собственных частот и форм колебаний лопаток ГТД при их проектировании с учетом их конструктивных особенностей является важной научной и практической задачей.

Как показывает практика, разброс расчетных собственных частот лопаток по некоторым формам колебаний в зависимости от параметров конечноэлементных сеток, вида применяемых граничных условий, типа замкового соединения лопаток с диском и размеров лопатки (масштабного фактора) может достигать достаточно больших величин.

Описанный в работе [4] подход к рациональному выбору параметров конечноэлементных сеток применялся к решению задачи расчетного определения статических напряжений в хвостовиках лопаток, в то время как влияние этих параметров на динамические характеристики лопаток описано в литературе недостаточно.

В работе [5] показано влияние вида граничных условий на спектр собственных частот для рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД с различными типами замкового соединения без учета масштабного фактора.

В данной работе приведены результаты расчетно-экспериментального анализа влияния параметров сеток конечных элементов, вида граничных условий и масштабного фактора на собственные частоты лопаток компрессоров авиационных ГТД с замковыми соединениями трех типов – «двузубая елка», «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа при их колебаниях по 1 изгибной (1И), 1 крутильной (1К) и 2 изгибной (2И) формам.

**2. Описание методики исследования**

Исследуемые лопатки, в зависимости от высоты пера ( $H_n$ ), условно разделялись на три масштабные группы:

- при  $H_n \leq 50$  мм – мелкие;
- при  $50 \text{ мм} < H_n < 100$  мм – средние;
- при  $H_n > 100$  мм – крупные.

В каждую масштабную группу отбиралось 3-7 лопаток каждого типа замкового соединения. Общее количество исследованных лопаток – 24 шт.

Расчеты собственных частот и форм колебаний лопаток выполнялись по методу конечных элементов с использованием трехмерных моделей. К лопаткам прикладывались три вида граничных условий: жесткая заделка (рис. 1а), запрещение перемещений по нормали к рабочим поверхностям хвостовика – симметричные граничные условия (рис. 1б) и расчет совместно с диском (рис. 1в).

При расчетах лопаток совместно с диском использовалась модель, включающая в себя циклосимметричный сектор диска с одной лопаткой, к границам которого прикладывались условия циклической симметрии, а рабочие поверхности хвостовика лопатки и межпазового выступа диска связывались условиями совместности перемещений (рис. 1 в).

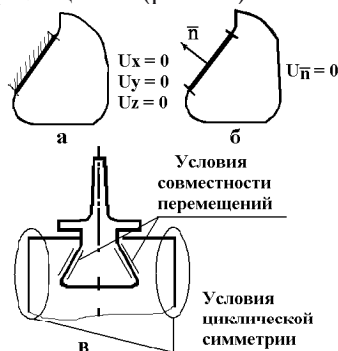


Рис. 1. Исследуемые виды граничных условий: а – жесткая заделка; б – симметричные граничные условия; в – расчет совместно с диском

Применение более сложных моделей, например, учитывающих контактное взаимодействие в замковых соединениях при колебаниях лопаток, вызывает необходимость решения задачи вынужденных нелинейных колебаний [2,3], требующей значительных машинных ресурсов и временных затрат, часто сопряженной с недостатком исходных данных (величины нестационарных по окружности газовых сил, коэффициенты демпфирования и др.), что не всегда оправдано на этапе проектирования. Расчеты лопаток совместно с диском выполнялись только при достаточно больших разбросах собственных частот (более 10%), полученных при использовании жесткой заделки и симметричных граничных условий.

Для анализа влияния вида применяемых граничных условий в зависимости от геометрических размеров лопаток и типа замкового соединения использовалась расчетно-экспериментальная методика, в ходе которой расчетные значения собственных частот лопаток, полученные с различными видами граничных условий, сравнивались с экспериментальными данными, полученными как на вибростенде, так и тензометрировании на работающем двигателе. Полученные результаты изображались графически на резонансно-частотных диаграммах (рис.2).

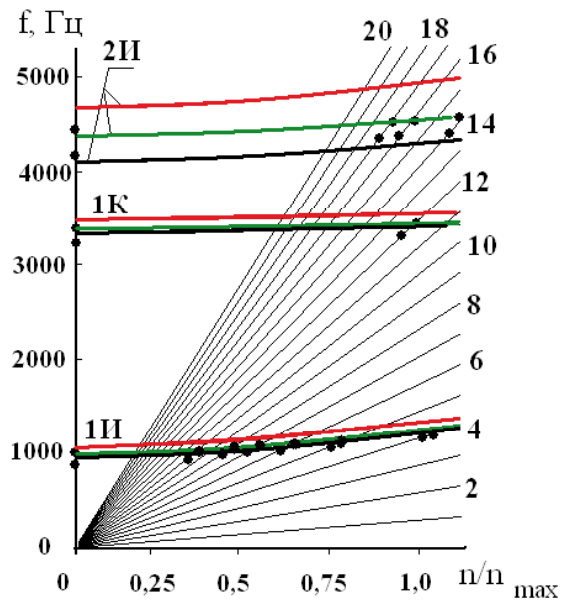


Рис.2. Применение расчетно-экспериментального анализа для выбора граничных условий: — жесткая заделка; — симметричные граничные условия; — расчет совместно с диском; • – экспериментальные данные

На основании расчетно-экспериментального анализа полученных резонансно-частотных диаграмм строились гистограммы, показываю-

шие распределения предпочтительных видов граничных условий в зависимости от формы колебаний, масштабного фактора и типа замковых соединений.

### 3. Анализ полученных результатов

В результате проведенного расчетно-экспериментального анализа было определено влияние факторов, оказывающих наибольшее влияние на точность расчетного определения собственных частот и форм колебаний лопаток ГТД.

#### 3.1 Влияние параметров конечноэлементной сетки

Для получения расчетных значений собственных частот лопаток ГТД конечноэлементная сетка должна достаточно точно отображать все особенности геометрии лопатки (особенно при расчете высокочастотных форм колебаний). Основным критерием, определяющим качество сетки, является верификация расчетных результатов с экспериментальными данными. Для этого допустимо применение подхода, при котором сравнение расчетных и экспериментальных результатов производится при последовательном увеличении густоты сетки путем уменьшения характерного размера конечного элемента в 2 раза [5]. При этом, если интересуется уточненное распределение относительных динамических напряжений (например, для определения мест расположения датчиков при тензометрировании), то требования к плотности сетки конечных элементов аналогичны требованиям, применяемым при расчетах статической прочности. При расчетах собственных частот и форм колебаний лопаток ГТД, применение конечных элементов 2 порядка и формирование регулярных сеток из элементов гексаэдрической формы, характерный размер которых определяется из условия обеспечения не менее 20 конечных элементов по хорде пера лопатки и 2 по толщине пера обеспечивает получение достаточно точных результатов.

#### 3.2 Влияние вида граничных условий

Как правило, изменение собственных частот лопаток в зависимости от применяемых граничных условий лежит в допустимых пределах, при этом их форма колебаний практически не изменяется. Однако встречаются такие формы колебаний лопаток, в которых в колебательное движение помимо пера вовлекается хвостовик. Данные формы колебаний становятся чувствительными к виду граничных условий, что может приводить к достаточно большому разбросам расчетных значений собственных частот колебаний лопаток (12...25%). Для этих

случаев проводились расчеты собственных частот и форм колебаний лопаток совместно с диском, поскольку при этом моделируется жесткость заделки лопатки наиболее близкая к реальной [6].

Примером таких форм колебаний для лопаток с замковым соединением «ласточкин хвост» кольцевого типа могут служить колебания по 1 изгибной форме, при которых сочетаются два вида движения – в плоскости максимальной и минимальной жесткости пера лопатки. Для лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» и «двузубая елка» – колебания по 2 изгибной форме при которых сочетаются движения в двух указанных выше плоскостях.

Данные формы колебаний, как правило, встречаются в крупногабаритных лопатках с относительно тонкой ножкой хвостовика.

В таблице 1 приведены величины процентных отношений максимальных суммарных относительных динамических перемещений в хвостовике и пера лопатки ( $\bar{U}_{\Sigma хв} / \bar{U}_{\Sigma пера}$ ), % при колебаниях по исследуемым формам.

**Таблица 1** – Соотношение между относительными динамическими перемещениями в хвостовике и пера лопатки, %

Форма колебаний	Вид граничных условий		
	Симметричные	Жесткая заделка	Расчет совместно с диском
1 изгибная	1,555	0,535	0,537
1 крутильная	3,922	1,010	1,542
2 изгибная	7,043	2,547	11,82

Данные соотношения приведены в качестве примера для лопатки с хвостовиком типа «двузубая елка» мелкой масштабной группы ( $H_{л}=45$  мм), резонансно-частотная диаграмма которой приведена на рис.2. Как видно из таблицы 1, для 2 изгибной формы колебаний лопатки имеет место наибольшее соотношение динамических перемещений хвостовика по отношению к перемещениям пера, что приводит к наибольшему разбросу собственных частот лопатки по этой форме колебаний в зависимости от применяемого вида граничных условий.

Следует отметить, что соотношения динамических перемещений, приведенные в таблице 1, качественно сохраняются и для лопаток с другими геометрическими размерами и типами замковых соединений, а отношение  $\bar{U}_{\Sigma хв} / \bar{U}_{\Sigma пера}$  может служить критерием чувствительности форм колебаний к виду граничных условий.

### 3.3 Влияние масштабного фактора

Как показывают результаты проведенного исследования, с увеличением масштабного фактора лопаток изменение их собственных частот в зависимости от вида граничных условий и типа замкового соединения, в основном, имеет тенденцию к снижению или остается практически постоянным [7].

$$\Delta f_{\Gamma Y} = |100\% - (f_{\text{сим}} / f_{\text{жест}}) \cdot 100\%|,$$

где  $f_{\text{сим}}$  – собственная частота лопатки, полученная в расчете с симметричными граничными условиями, Гц;

$f_{\text{жест}}$  – собственная частота лопатки, полученная в расчете с жесткими граничными условиями, Гц.

Как видно из рис.3а, с увеличением размеров лопаток с замковым соединением типа «двузубая елка» разброс частот  $\Delta f_{\Gamma Y}$  по 1 крутильной и 2 изгибной формам колебаний уменьшается с 7 до 3% и с 12 до 8% соответственно, а по 1 изгибной форме колебаний имеет небольшую тенденцию к росту с 6 до 8%.

Для лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа при колебаниях по 1 изгибной и 1 крутильной формам колебаний зависи-

мость  $\Delta f_{\Gamma Y} = f(N_{\text{д}})$  практически постоянная, а разброс по ним не превышает 5% (рис. 3б и рис. 3в). Однако при колебаниях данных лопаток по 2 изгибной форме, с увеличением масштабного фактора лопаток разброс частот  $\Delta f_{\Gamma Y}$  нелинейно возрастает до 20% для лопаток с хвостовиками типа «ласточкин хвост» и 14% - для замкового соединения «ласточкин хвост» кольцевого типа, что говорит о высокой чувствительности данной формы колебаний к виду применяемых граничных условий.

Выбор предпочтительного вида граничных условий для расчетов собственных частот и форм колебаний лопаток осуществлялся по гистограммам, построенным для лопаток исследуемых масштабных групп, типов замковых соединений и форм колебаний способом голосования [7]. В соответствии с которым, в случае разногласия в полученных рекомендациях по выбору граничных условий по различным формам колебаний лопаток одного типа, в расчетах необходимо применять тот вид граничных условий, который выбран для большинства форм колебаний данной лопатки.

Данные гистограммы (рис.4) представляют собой наборы статистических данных в виде распределений определенного количества лопаток, для которых принят тот или иной вид граничных условий для каждой из исследуемых форм колебаний, которые строились по результатам анализа расчетно-экспериментальных резонансно-частотных диаграмм лопаток. Гистограммы для крупных лопаток с замковым соединением «ласточкин хвост» кольцевого

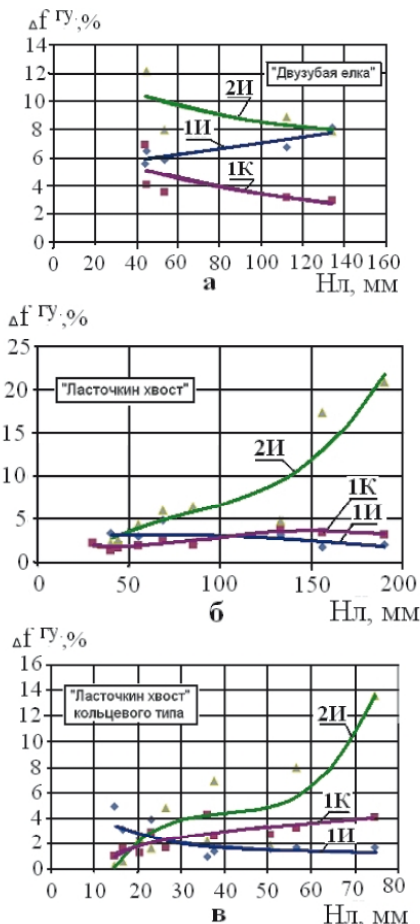


Рис.3. Зависимости расчетного разброса частот, обусловленного граничными условиями, от высоты пера лопатки:

а – «двузубая елка»; б – «ласточкин хвост»;  
в – «ласточкин хвост» кольцевого типа;

— ; ◆ – 1 изгибная форма;  
— ; ■ – 1 крутильная форма; — ; ▲ – 2 изгибная форма

На рис. 3 показаны расчетные зависимости относительной величины разброса собственных частот колебаний, вызываемого граничными условиями типа «жесткая заделка» и «симметричные» ( $\Delta f_{\Gamma Y}, \%$ ) от высоты пера лопаток для исследуемых типов замковых соединений и форм колебаний. Совокупности расчетных точек для каждой формы колебаний аппроксимировались полиномами 2-3 степени. Величина  $\Delta f_{\Gamma Y}$  определялась следующим образом:



типа не приведены в связи с отсутствием лопаток данного типа на двигателях.

На гистограммах предусмотрены три вида рекомендуемых граничных условий – жесткие, симметричные и когда допустимо применять любой из этих двух вариантов, т.е. вид граничных условий не принципиален.

Последний результат выбирался в случае, если рассчитанные с разными граничными условиями собственные частоты лопаток мало отличаются друг от друга ( $\Delta f_{гу} \leq 2\%$ ) или оба значения данных частот находились внутри экспериментального диапазона. Вид выбранных граничных условий определялся по большинству «голосов» за каждый.

Таким образом, в результате проведенного расчетно-экспериментального анализа, сформированы практические рекомендации по рациональному выбору граничных условий для лопаток авиационных ГТД в зависимости от их масштаба и типа замковых соединений, приведенные в табл.2.

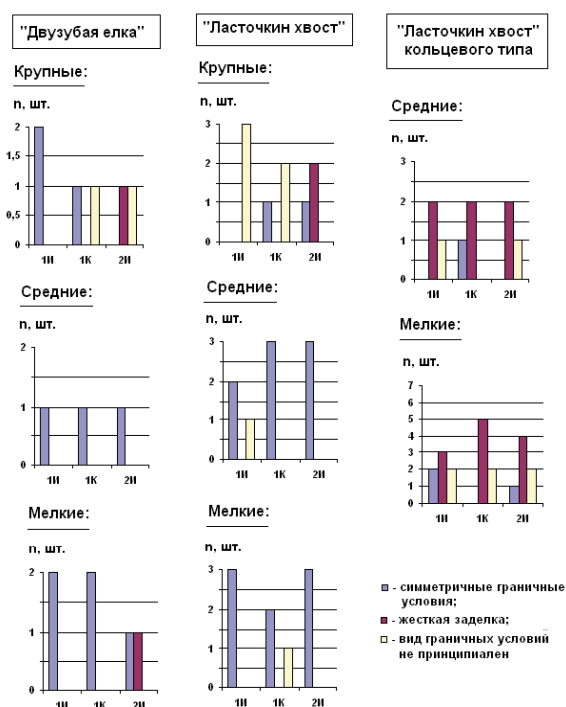


Рис. 4. Гистограммы, показывающие распределение предпочтительного выбора вида граничных условий для лопаток

**Таблица 2** – Рекомендуемые граничные условия при расчете собственных частот и форм колебаний лопаток

Масштабная группа	Форма колебаний	Тип замкового соединения		
		«Двузубая елка»	«Ласточкин хвост»	«Ласточкин хвост» кольцевого типа
Крупные ( $H_l > 100$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Не принципиально	—
	1 крутильная		Не принципиально	—
	2 изгибная	Жесткие	Жесткие	—
Средние ( $50 \text{ мм} < H_l < 100$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Симметричные	Жесткие
	1 крутильная			
	2 изгибная			
Мелкие ( $H_l \leq 50$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Симметричные	Жесткие

**Заключение**

1. По результатам проведенного расчетно-экспериментального анализа даны практические рекомендации по рациональному выбору параметров конечноэлементных сеток, а также граничных условий для определения собственных частот и форм колебаний рабочих лопаток компрессоров ГТД в зависимости от масштабного фактора и типа замкового соединения.

2. Наибольшее влияние вид граничных условий оказывает на те формы колебаний лопаток,

при которых в колебательном движении участвует хвостовик вне зависимости от масштабного фактора.

3. Для лопаток со всеми тремя исследуемыми типами замковых соединений и масштабных групп наибольший разброс частот в зависимости от граничных условий получен при колебаниях по 2 изгибной форме, что говорит о высокой чувствительности данной формы колебаний к виду применяемых граничных условий.

## Литература

1. Муравченко Ф.М., Шереметьев А.В. Об особенностях прочностной доводки современных АГТД на заданный ресурс // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. — Харьков.: — Харьковский гос.аэрокосмич.ун-т, 1999. — Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. — С. 5–9.
2. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. И.А. Биргера, Б.Ф.Шорра, - М.: машиностроение, 1981, - 232 с.
3. Писаренко Г.С., Воробьев Ю.С. Вопросы моделирования колебаний лопаток турбомашин // Проблемы прочности. — 2000. — №5. — С. 122-126.
4. J.R. Beisheim, G.B. Sinclair. On the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dovetail Attachments // Journal of Turbomachinery, — 2003. — Vol.125, No 2. — P.372-379.
5. Выбор необходимых параметров конечно-элементных сеток при расчетах на прочность лопаток авиадвигателей / Шереметьев А.В., Петров А.В. // Авиационно-космическая техника и технология. — 2004. — № 7(15). — С.114 — 118.
6. Петров А.В., Тихомиров В.В., Хромов В.А. Рациональный выбор граничных условий при расчете собственных частот и форм колебаний лопаток авиационных ГТД в зависимости от типа замкового соединения // Вестник двигателестроения: Науч.-техн. журнал. — 2012. — №1. — С.41–46.
7. Петров А.В., Тихомиров В.В., Донченко В.В. Влияние масштабного фактора и вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний лопаток авиационных ГТД с различными типами замковых соединений // Вестник двигателестроения: Науч.-техн. журнал. — 2013. — №1. — С.58–64.

*Поступила в редакцию 01.06.2013*

**О.В. Петров, В.В. Тихомиров, В.В. Донченко. Головні шляхи підвищення точності розрахункового визначення власних частот і форм коливань лопаток ГТД**

*Визначені основні фактори, які мають найбільший вплив на точність розрахунків власних частот і форм коливань робочих лопаток компресора ГТД. Проведено розрахунково-експериментальний аналіз впливу виду граничних умов на власні частоти і форми коливань лопаток в залежності від масштабного фактору і типу замкового з'єднання. Розглянуті лопатки з замковими з'єднаннями трьох типів — «двозуба ялинка», «ластівчин хвіст», «ластівчин хвіст» кільцевого типу. Виконана статистична обробка результатів. Надані практичні рекомендації для раціонального вибору граничних умов під час проектування лопаток з замковими з'єднаннями досліджуваних типів і масштабних груп.*

**Ключові слова:** *робочі лопатки компресора, розрахунково-експериментальний аналіз, власна частота, форма коливань, граничні умови, масштабний фактор, тип замкового з'єднання, ГТД.*

**A.V. Petrov, V.V. Tichomirov, V.V. Donchenko. Basic ways to increase accuracy of calculated definition of GTE's blades natural frequencies and mode shapes**

*The main factors, making the greatest impact on accuracy calculations of natural frequencies and mode shapes of GTE's compressor blades are defined. The experiment-calculated analysis of influence of a kind of boundary conditions on blades natural frequencies and mode shapes depending on the scale factor and blade-disk joint type is carried out. Blades with blade-disk joints of three types - «two-teeth fir-tree», «dovetail» attachment and ring-type «dovetail» is considered. Statistical processing of results is executed. Practical recommendations at a rational choice of boundary conditions for blades designing with investigated types of blade-disk joints and scale groups are given.*

**Key words:** *compressor blades, experiment-calculated analysis, natural frequency, mode shape, scale factor, boundary conditions, blade-disk joint type, GTE.*