

УДК 629.7.036:539.4

А. В. Петров, В. В. Тихомиров, В. В. Донченко

ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА И ВИДА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Проведен расчетно-экспериментальный анализ по оценке влияния вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД в зависимости от масштабного фактора и типа замкового соединения. Выполнена статистическая обработка результатов. Даны практические рекомендации по выбору граничных условий при проектировании лопаток.

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

Введение

Отстройка рабочих лопаток компрессоров авиационных 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 авиационных ГТД при их проектировании с учетом их конструктивных особенностей является важной научной и практической задачей.

Постановка задачи исследования

Применение современных методик расчета с использованием моделей высокого уровня, в первую очередь на основе метода конечных элементов, позволяет с достаточной для практики точностью определять собственные частоты и формы колебаний лопаток ГТД [3, 4]. Однако, как показывает практика, разброс расчетных собственных частот лопаток по некоторым формам колебаний в зависимости от вида применяемых граничных условий, типа замкового соединения лопаток с диском и размеров лопатки (масштабного фактора) может достигать достаточно больших величин.

В работе [5] показано влияние вида граничных условий на спектр собственных частот для

рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД с различными типами замкового соединения, однако полученные результаты не учитывали масштабного фактора лопаток.

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

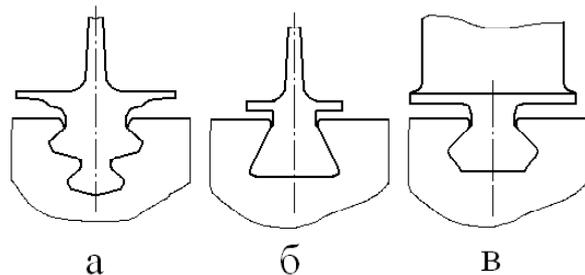


Рис. 1. Исследуемые типы замковых соединений лопаток:

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

Описание методики исследования

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

- при $H_l \leq 50$ мм – мелкие;
- при 50 мм $< H_l < 100$ мм – средние;
- при $H_l > 100$ 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. 2, а), запрещение перемещений по нормали к рабочим поверхностям хвостовика – симметричные граничные условия (рис. 2, б) и расчет совместно с диском.

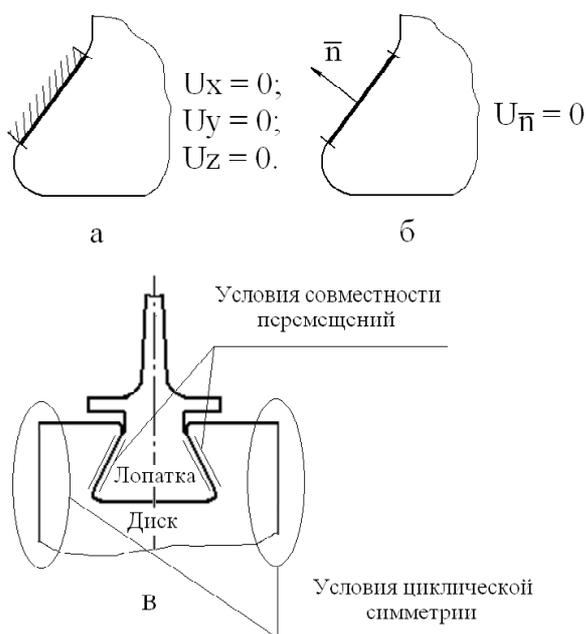


Рис. 2. Исследуемые виды граничных условий: а – жесткая заделка; б – симметричные граничные условия; в – расчет с диском

При расчетах лопаток совместно с диском использовалась модель, включающая в себя цикло-симметричный 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. 2, в). Данная модель позволяет решать задачу собственных значений в линейной постановке в рамках модального анализа, в результате решения которой получаются спектры собственных частот в виде семейств с различными числами узловых диаметров. Применение более сложных моделей, например, учитывающих контактное взаимодействие в замковых соединениях при колебаниях лопаток вызывают необходимость решения задачи вынужденных нелинейных колебаний [6–8], требующей значительных машин-

ных 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. 3). Аналогичные резонансно-частотные диаграммы строились для всех исследуемых лопаток. На основании расчетно-экспериментального анализа полученных резонансно-частотных диаграмм строились гистограммы, показывающие распределения предпочтительных видов граничных условий в зависимости от формы колебаний, масштабного фактора лопаток и типа замковых соединений. Выбор подходящих граничных условий осуществлялся на основе статистической обработки результатов методом голосования.

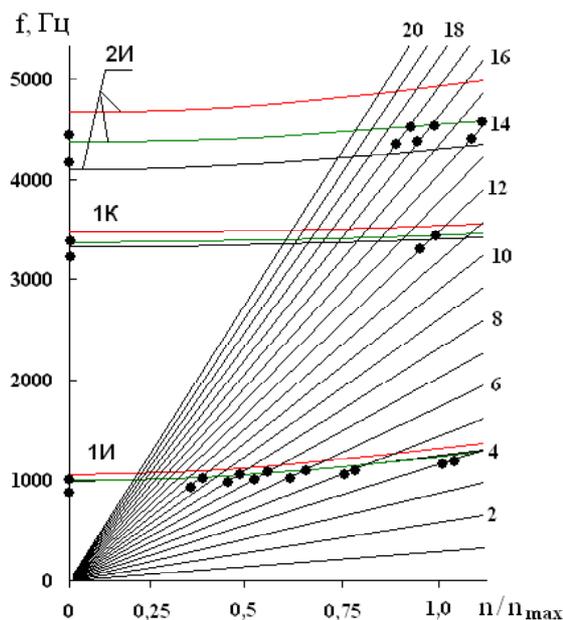


Рис. 3. Применение расчетно-экспериментальной методики для выбора граничных условий: — жесткая заделка; — симметричные граничные условия; — расчет с диском; ● — эксперимент

Анализ полученных результатов

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. 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 большим 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.

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 пере лопатки ($\bar{u}_{\Sigma хв} / \bar{u}_{\Sigma пера}$) при колебаниях по исследуемым формам. Данные соотношения приведены в качестве примера для лопатки с хвостовиком типа «двузубая елка» мелкой масштабной группы ($H_n = 45$ мм), резонансно-частотная диаграмма которой приведена на рис. 3. 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 (рис. 3).

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.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости относительной величины разброса собственных частот колебаний, вызываемого граничными условиями типа «жесткая заделка» и «симметричные» (Δf^{zv} , %) 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 Δf^{zv} определялась следующим образом:

$$\Delta f^{zv} = |100 \% - (f_{сим} / f_{жест}) \cdot 100 \%|,$$

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

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

Как видно из рис. 4, а, с увеличением размеров лопаток с замковым соединением типа «двузубая елка» разброс частот Δf^{zv} 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 зависимость $\Delta f^{zv} = f(H_n)$ практически постоянная, а разброс по ним не превышает 5 % (рис. 4, б и рис. 4, в). Однако, при колебаниях данных лопаток по 2 изгибной форме, с увеличением масштабного фактора лопаток разброс частот Δf^{zv} 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.

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

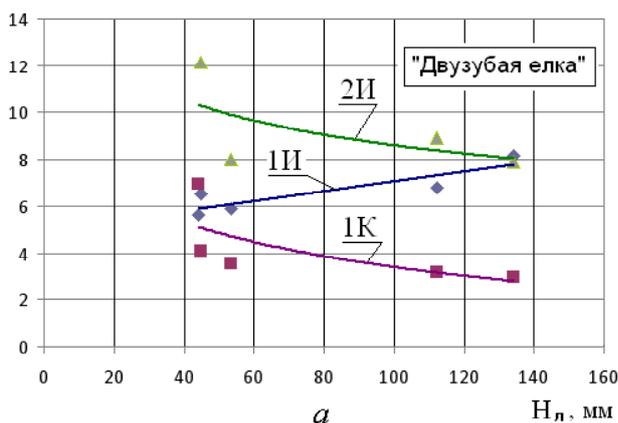
Форма колебаний	Вид граничных условий		
	Симметричные	Жесткая заделка	Расчет совместно с диском
1 изгибная	1,555	0,535	0,537
1 крутильная	3,922	1,010	1,542
2 изгибная	7,043	2,547	11,82

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 (рис. 5) методом голосования.

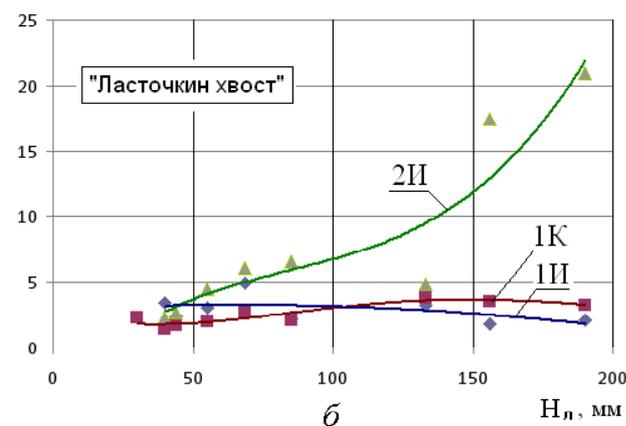
Данные гистограммы представляют собой наборы статистических данных в виде распределений определенного количества лопаток, для ко-

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

$\Delta f_{г\gamma}$, %



$\Delta f_{г\gamma}$, %



$\Delta f_{г\gamma}$, %

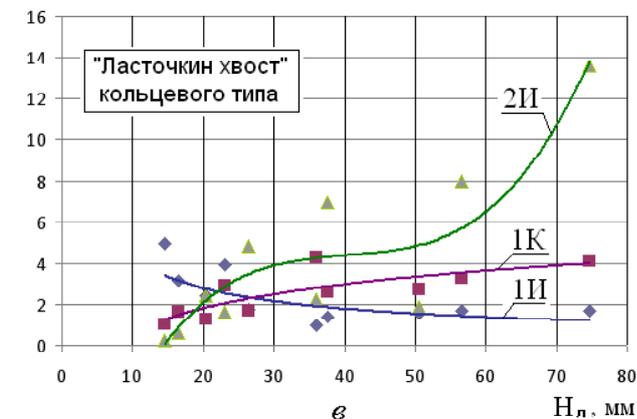


Рис. 4. Зависимости расчетного разброса частот, обусловленного граничными условиями, от высоты пера лопатки:

a – «двузубая елка»; $б$ – «ласточкин хвост»; $в$ – «ласточкин хвост» кольцевого типа;
 —; ◆ – 1 изгибная форма; —; ■ – 1 крутильная форма; —; ▲ – 2 изгибная форма

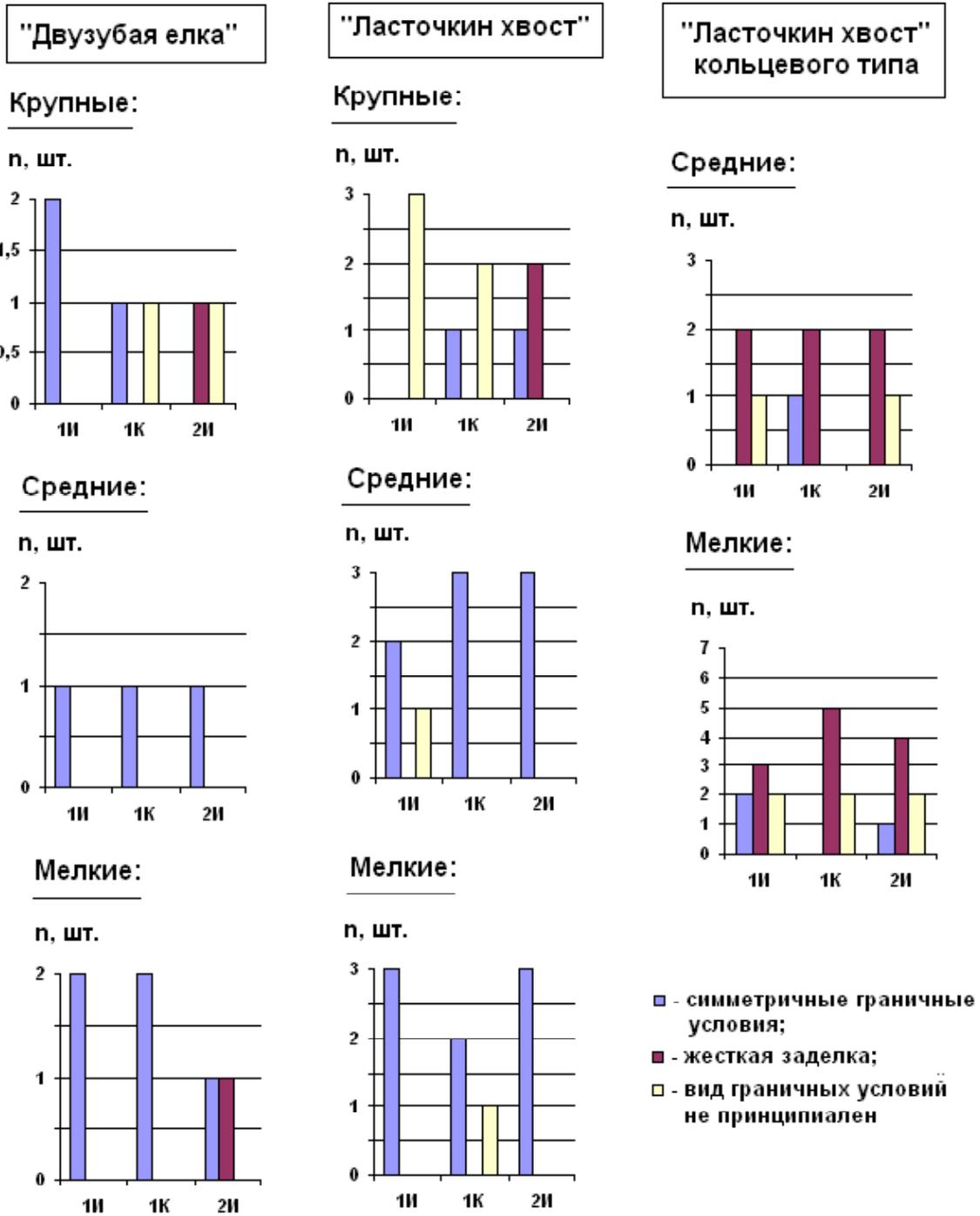


Рис. 5. Гистограммы, показывающие распределение предпочтительного выбора вида граничных условий для лопаток в зависимости от масштабного фактора, типа замкового соединения и формы колебаний

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 ($\Delta f^{\text{св}} \leq 2\%$)

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, приведенных в табл. 2.

Очевидно, что в случае различия данных по выбору граничных условий для разных форм колебаний лопаток одного типа (табл. 2), в расчетах необходимо применять тот вид граничных условий, который выбран для большинства форм колебаний данной лопатки, однако для отстройки конкретной формы колебаний от опасного резонанса целесообразно применять тот вид граничных условий, который наиболее подходит к ней по результатам проведенного расчетно-экспериментального анализа.

Выводы

1. По результатам проведенного расчетно-экспериментального анализа даны практические ре-

комендации по рациональному выбору граничных условий для определения собственных частот и форм колебаний рабочих лопаток компрессоров авиационных 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.

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 ($H_t > 100$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Не принципиально	–
	1 крутильная		Не принципиально	–
	2 изгибная	Жесткие	Жесткие	–
Средние ($50 \text{ мм} < H_t < 100$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Симметричные	Жесткие
	1 крутильная			
	2 изгибная			
Мелкие ($H_t \leq 50$ мм)	1 изгибная	Симметричные	Симметричные	Жесткие
	1 крутильная			
	2 изгибная	Не принципиально		

Список литературы

- Муравченко Ф. М. Об особенностях прочностной доводки современных АГТД на заданный ресурс / Ф. М. Муравченко, А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология : сб. научн. тр. – Харьков : – Харьковский гос. аэрокосмич. ун-т, 1999. – Вып.9. – Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 5–9.
- Динамика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И. А. Биргера, Б. Ф. Шорра. – М. : Машиностроение, 1981. – 232 с.
- Писаренко Г. С. Вопросы моделирования колебаний лопаток турбомашин / Г. С. Писаренко, Ю. С. Воробьев // Проблемы прочности. – 2000. – № 5. – С. 122–126.
- Анализ колебаний турбинного лопаточного аппарата на основе трехмерных моделей / Ю. С. Воробьев, С. Янецки, Е. В. Тишковец, С. П. Канило // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 4 (20). – С. 19–23.
- Рациональный выбор граничных условий при расчете собственных частот и форм колебаний лопаток авиационных ГТД в зависимости от типа замкового соединения / А. В. Петров, В. В. Тихомиров, В. А. Хромов // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 41–46.
- Beisheim J.R. On the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dovetail Attachments / J. R. Beisheim, G. B. Sinclair // Journal of Turbomachinery. – 2003. – Vol. 125. – N 2. – P. 372–379.
- On Forced Vibration of Shrouded Turbine Blades / [Szwedowicz J., Sextro W., Visser R., Masserey P.A.] // Proceedings of ASME Turbo Expo, GT-2003-38808.
- Petrov E. P. Method for Use of Cyclic Symmetry Properties in Analysis of Nonlinear Multiharmonic Vibrations of Bladed Disks / E. P. Petrov // Proceedings of ASME Turbo Expo, GT-2003-38480.

Поступила в редакцию 18.10.2012

Петров О.В., Тихомиров В.В., Донченко В.В. Вплив масштабного фактору і виду граничних умов на власні частоти і форми коливань лопаток авіаційних ГТД з різними типами замкових з'єднань

Проведено розрахунково-експериментальний аналіз для оцінки впливу виду граничних умов на власні частоти і форми коливань робочих лопаток компресорів авіаційних ГТД в залежності від масштабного фактору і типу замкового з'єднання. Було виконано статистичну обробку результатів. Надано практичні рекомендації для вибору граничних умов для проектування лопаток.

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

Petrov A., Tikhomirov V., Donchenko V. Effect of scale factor and type of boundary conditions on natural frequencies and modes of aircraft GTE blades with different types of roots

The design-experimental analysis on assessment of effect of boundary conditions on natural frequencies and vibrations modes of aero GTE compressor blades depending on the scale factor and type of root attachment was carried out. Statistic processing of results was performed. Practical recommendations are given on choice of boundary conditions for blade designing.

Key words: aero GTE, compressor blades, design-experimental analysis, natural frequency, blade mode, boundary conditions, scale factor, type of root attachment.