

УДК 629.7.036:539.4

Канд. техн. наук А. В. Петров, В. В. Тихомиров, В. А. Хромов

ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Проведен расчетно-экспериментальный анализ влияния вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний рабочих лопаток компрессора авиационных ГТД с замковыми соединениями трех типов — «двузубая елка», «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа. Даны практические рекомендации по рациональному выбору граничных условий при проектировании лопаток с замковыми соединениями данных типов.

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

Введение

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) широко используется для расчета статической и динамической прочности деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1–3]. В частности применение МКЭ для расчета на прочность лопаток ГТД 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 [3–5]. Однако применение конечно-элементных моделей требует их адаптации к конкретным инженерным задачам. Применительно к лопаткам ГТД данная адаптация включает в себя рациональный выбор следующих параметров [6, 7]:

- типа и формы конечных элементов;
- степени густоты конечно-элементной 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 (т.е. резонансов с повышенным уровнем динамических напряже-

ний на максимальных частотах вращения ротора) при проектировании, что особенно актуально при отстройке высокочастотных форм колебаний, когда спектр собственных и возбуждающих частот достаточно плотный.

Постановка задачи исследования

Запрещение перемещений вдоль заданных степеней свободы — это единственный вид граничных условий в модальном анализе — анализе собственных частот и форм линейных колебаний. Эти граничные условия делают задачу линейной и позволяют выполнять расчеты достаточно быстро, что важно для оперативного выбора вариантов конструкции лопаток при проектировании.

На рис. 1 показаны два основных вида граничных условий, используемые в модальном анализе лопаток ГТД, которые прикладываются к рабочим поверхностям хвостовиков. Жесткая заделка запрещает перемещения по всем трем степеням свободы (для объемных конечных элементов), а симметричные граничные условия — вдоль нормали к прикладываемой поверхности.

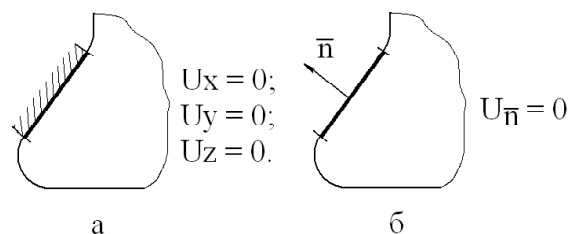


Рис. 1. Основные виды граничных условий, прикладываемых к рабочим поверхностям хвостовиков лопаток при расчете собственных частот и форм колебаний: а — жесткая заделка; б — симметричные граничные условия

Однако описанные граничные условия не лишены недостатков, поскольку жесткая заделка может завышать расчетные собственные частоты по сравнению с действительными, а симметричные граничные условия запрещают перемещения вдоль нормали к рабочим поверхностям хвостовиков лопаток как вверх, так и вниз по отношению к данной поверхности, что также недостаточно точно моделирует работу замкового соединения лопатки с диском. Выходом из данного положения является моделирование контактного взаимодействия в соединениях лопаток.

Использование контактного взаимодействия в задачах динамики требует решения задачи нелинейных вынужденных колебаний [8], получение исходных данных для которой (нестационарные газовые силы, демпфирование и др.) связаны с определенными трудностями, а решение задач такого типа требует значительных вычислительных и временных затрат.

Для различных типов замковых соединений лопаток влияние граничных условий на собственные частоты и формы колебаний лопаток недостаточно исследовано. Поэтому определение влияния вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний лопаток ГТД для различных типов замковых соединений в рамках модального анализа является актуальной научной и практической задачей.

Целью данной работы является выработка практических рекомендаций по рациональному выбору граничных условий при расчетах собственных частот и форм колебаний лопаток авиационных ГТД в зависимости от типа замкового соединения.

Описание методики исследования

В данной работе приводится расчетно-экспериментальный анализ влияния вида граничных условий (жесткая заделка и симметричные граничные условия) на собственные частоты лопаток авиационных ГТД. Исследовались три основных типа замковых соединений, применяемых для рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД — «двузубая елка», «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа

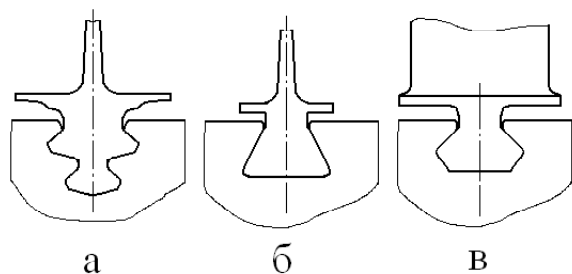


Рис. 2. Исследуемые типы замковых соединений лопаток: а — «двузубая елка»; б — «ласточкин хвост»; в — «ласточкин хвост» кольцевого типа

хвост» кольцевого типа (рис. 2). Расчеты проведены по МКЭ в трехмерной постановке. Формы колебаний рассчитаны до 2-й крутильной, поскольку более высокие формы колебаний на двигателях либо не проявляются, либо имеют невысокий уровень напряжений, а отстройка этих форм от резонансов связана со значительными трудностями. Экспериментальные данные получены путем тензометрирования лопаток на работающем двигателе.

Анализ полученных результатов

Собственные частоты лопаток с исследуемыми типами замковых соединений без учета вращения представлены в табл. 1–3. Как видно из табл. 1–3, расхождение частот по некоторым формам в зависимости от типа применяемых граничных условий могут достигать значительных величин (до 25 %), кроме того, могут появляться новые формы.

Для анализа влияния граничных условий на собственные формы и частоты колебаний лопаток в рабочих условиях необходимо проводить сравнение расчетных частот с экспериментальными на резонансно-частотных диаграммах отдельно — для первой изгибающей и для высокочастотных форм колебаний (рис. 3 и 4).

При колебаниях лопаток с замковым соединением типа «двузубая елка» по первой изгибающей форме собственные частоты, полученные в расчете с симметричными граничными условиями, наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными (рис. 3, а). Это, по всей видимости, объясняется тем, что данный вид граничных условий позволяет моделировать условия работы замкового соединения с четырьмя рабочими поверхностями более близко к реальным, чем жесткая заделка.

Как видно из рис. 3, б и 3, в, для лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа при относительно невысоких частотах вращения (до 50...60 % от максимальных) вид граничных условий не принципиален при расчете собственных частот первой изгибающей формы, поскольку расчетные частоты, полученные при обоих видах граничных условий, находятся внутри экспериментального диапазона. Однако при приближении к максимальным значениям частоты вращения наблюдается тенденция к некоторому завышению расчетных частот по отношению к экспериментальным, при этом собственные частоты, полученные с использованием симметричных граничных условий ниже, чем с жесткой заделкой. Поэтому, в данном случае, рекомендуется использование симметричных граничных условий, собственные частоты при которых на максимальной частоте вращения лежат ближе к экспериментальному диапазону.

Таблица 1 – Влияние граничных условий на собственные частоты лопаток с замковыми соединениями типа «двузубая елка»

Форма колебаний	Собственная частота, Гц		Отличие, %
	Жесткая заделка	Симметрич. гр. условия	
1 изгибная	347	323	7,4
1 крутильная	1180	1076	9,7
1 крутильная (разновидность)	1540	1490	3,4
2 изгибная	2678	2443	9,6
Изгибно-крутильная	3376	3113	8,4
3 изгибная	3630	3434	5,7
2 изгибная + 1 крутильная	4832	4371	10,5
2 крутильная	5312	5154	3,1

Таблица 2 – Влияние граничных условий на собственные частоты лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост»

Форма колебаний	Собственная частота, Гц		Отличие, %
	Жесткая заделка	Симметрич. гр. условия	
1 изгибная	467	456	2,4
1 крутильная	1572	1514	3,8
1 крутильная (разновидность)	2040	1995	2,3
2 изгибная	3072	2454	25,2
Изгибно-крутильная	3975	3841	3,5
3 изгибная	4874	4810	1,3
2 изгибная + 1 крутильная	6637	6468	2,6
2 крутильная	7667	7569	1,3

Таблица 3 – Влияние граничных условий на собственные частоты лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» кольцевого типа

Форма колебаний	Собственная частота, Гц		Отличие, %
	Жесткая заделка	Симметрич. гр. условия	
1 изгибная	525	514	2,1
В плоскости максимальной жесткости	–	1494	–
1 крутильная	1795	1884	-4,7
1 крутильная (разновидность)	2178	–	–
2 изгибная	2936	2546	15,3
Изгибно-крутильная	4799	4697	2,1
3 изгибная	6214	5913	5,1
2 крутильная	7240	7196	0,6

Различия в расчетных значениях собственных частот из-за разных граничных условий в лопатках с замковыми соединениями типа «двузубая елка» и «ласточкин хвост» кольцевого типа при колебаниях по высокочастотным формам практически совпадают с разбросом частот, полученных в эксперименте, или полностью перекрываются экспериментальным диапазоном (рис. 4, а и 4, в). Достаточно широкий разброс собственных частот высокочастотных форм колебаний лопаток может быть вызван их чувствительностью даже к небольшим технологическим отклонениям формы.

При расчете высокочастотных форм колебаний лопаток с хвостовиками типа «ласточкин хвост» большинство форм колебаний лучше согласуются с экспериментальными данными при использовании симметричных граничных условий (рис. 4, б).

Некоторые формы, полученные в расчете, не проявились в эксперименте на двигателе, что, вероятно, связано с отсутствием явного возбудителя или расположением тензодатчиков. В связи с этим, могут потребоваться дополнительные исследования по мере накопления экспериментальных данных.

Таким образом, при расчетах собственных частот лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» при колебаниях по высокочастотным формам колебаний целесообразно применять симметричные граничные условия, а для лопаток с замковыми соединениями типа «двузубая елка» и «ласточкин хвост» кольцевого типа вид граничных условий не принципиален.

Описанные в работе лопатки с различными типами замковых соединений имеют примерно одинаковые геометрические характеристики. Как известно, влияние конструктивных факторов и технологических отклонений формы профиля в различной степени влияют на спектр собственных частот лопаток в зависимости от их размеров. Поэтому, проведение аналогичного анализа влияния вида граничных условий на собственные частоты и формы лопаток с различными типами замковых соединений в зависимости от масштабного фактора является перспективой дальнейших исследований.

Выводы

1. При расчетах собственных частот и форм лопаток с замковыми соединениями типа «двузубая елка», «ласточкин хвост» и «ласточкин хвост» кольцевого типа при колебаниях по первой изгибной форме целесообразно применение симметричных граничных условий.

2. Вид применяемых граничных условий не принципиален при расчете высокочастотных собственных форм колебаний лопаток с замковыми соединениями типа «двузубая елка» и «ласточкин хвост» кольцевого типа.

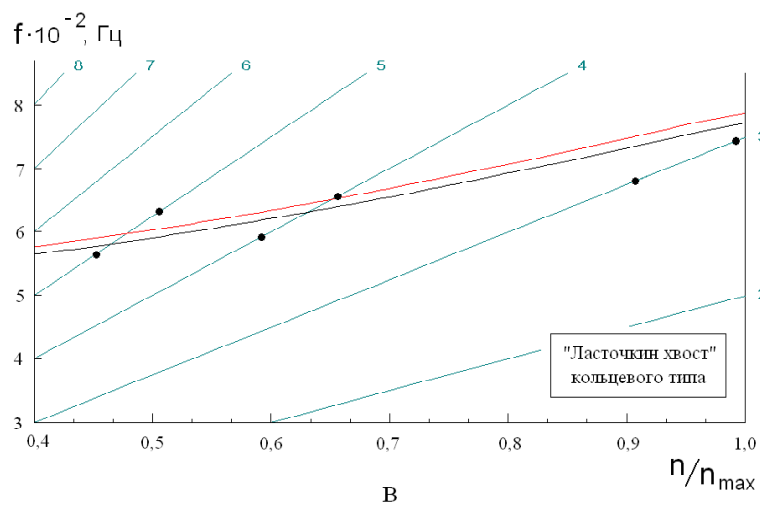
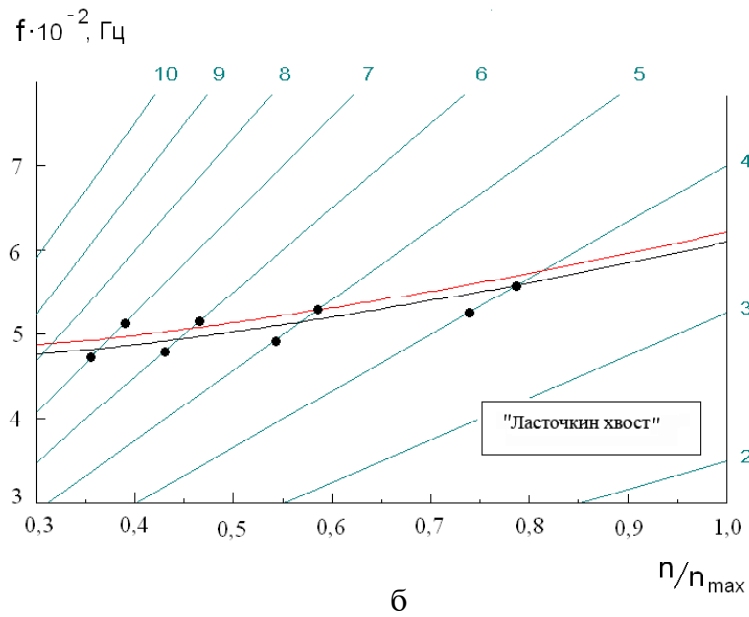
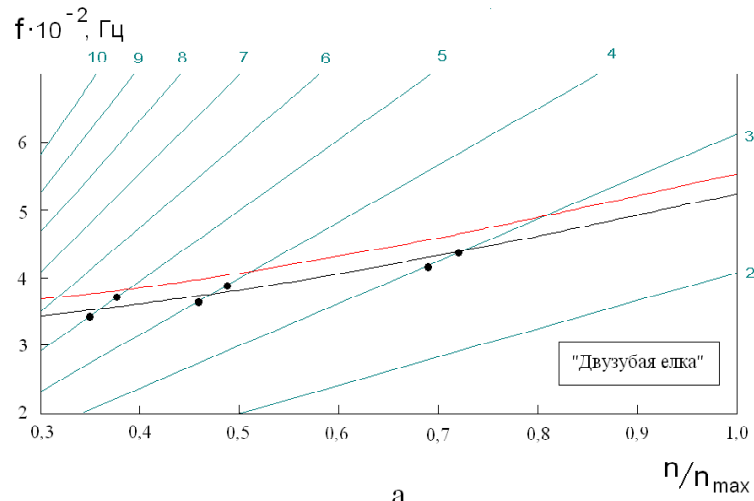


Рис. 3. Резонансно-частотные диаграммы лопаток при колебаниях по 1 изгибной форме с исследуемыми типами замковых соединений и граничных условий: а – «двузубая елка»; б – «ласточкин хвост»; в – «ласточкин хвост» кольцевого типа; — жесткая заделка; — симметричные граничные условия; • – эксперимент

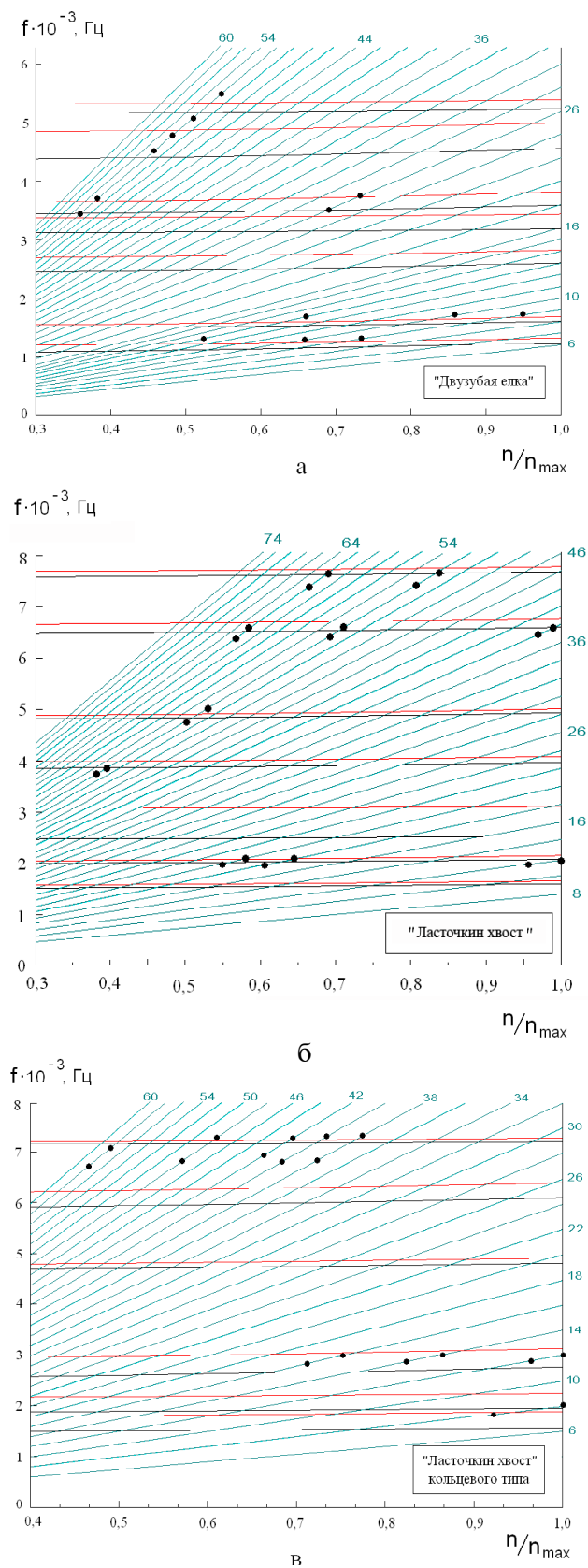


Рис. 4. Резонансно-частотные диаграммы лопаток при колебаниях по высокочастотным формам с исследуемыми типами замковых соединений и граничных условий: *а* – «двузубая елка»; *б* – «ласточкин хвост»; *в* – «ласточкин хвост» кольцевого типа; — — — жесткая заделка; — — — симметричные граничные условия; • — эксперимент

3. Расчет высокочастотных собственных форм колебаний лопаток с замковыми соединениями типа «ласточкин хвост» рекомендуется проводить с симметричными граничными условиями.

4. Для уточнения данных по некоторым формам колебаний, не проявившихся в эксперименте, могут потребоваться дополнительные исследования.

5. Определение влияния масштабного фактора на спектр собственных частот лопаток в зависимости от вида граничных условий и типа замкового соединения является перспективой дальнейших исследований.

Список литературы

1. Муравченко Ф. М. Об особенностях прочностной доводки современных АГТД на заданный ресурс / Муравченко Ф. М., Шереметьев А. В. // *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. Писаренко Г. С. Вопросы моделирования колебаний лопаток турбомашин / Писаренко Г. С., Воробьев Ю. С. // *Проблемы прочности*. — 2000. — № 5. — С. 122–126.
3. Воробьев Ю. С. Использование трехмерных конечно-элементных моделей при исследовании динамики рабочих колес осевых тур-

бомашин / Воробьев Ю. С., Канило С. П., Никулина Е. И. // *Динамика роторных систем* : сб. тр. междунар. конф. — Каменец-Польский, 1996. — С. 104–105.

4. Борискин О. Ф. Конечно-элементный анализ колебаний машин / Борискин О.Ф., Кулибаба В.В., Репецкий О.В. — Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1989 — 144 с.
5. Анализ колебаний турбинного лопаточного аппарата на основе трехмерных моделей / [Воробьев Ю. С., Янецки С., Тишковец Е. В., Канило С. П.] // *Вибрации в технике и технологиях*. — 2001. — № 4(20). — С. 19–23.
6. Шереметьев А. В. 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.
7. 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.
8. On Forced Vibration of Shrouded Turbine Blades / [Szwedowicz J., Sextro W., Visser R., Masserey P.A.] // *Proceedings of ASME Turbo Expo, GT-2003-38808*.

Поступила в редакцию 18.05.2011

Петров О.В., Тихомиров В.В., Хромов В.А. Рациональний вибір граничних умов при розрахунку власних частот і форм коливань лопаток авіаційних ГТД в залежності від типу замкового з'єднання

Проведено розрахунково-експериментальний аналіз впливу виду граничних умов на власні частоти і форми коливань робочих лопаток компресора авіаційних ГТД з замковими з'єднаннями трьох типів — «двозуба ялинка», «ластівчин хвіст» та «ластівчин хвіст» кільцевого типу. Дано практичні рекомендації по раціональному вибору граничних умов при проектуванні лопаток з замковими з'єднаннями даних типів.

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

Petrov A., Tichomirov V., Chromov V. Rational choice of boundary conditions at calculation of natural frequencies and mode shapes of aircraft GTE's blade depending on blade-disk joint type

The experiment-calculated analysis of influence of a kind of boundary conditions on natural frequencies and mode shapes of aircraft GTE's compressor blades with blade-disk joints of three types — «two-teeth fir-tree», «dovetail» attachment and ring-type «dovetail» is carried out. Practical recommendations at a rational choice of boundary conditions at designing of blade with blade-disk joints of these types are given.

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