

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ К ДОЗВУКОВОМУ РЕШЕТОЧНОМУ ФЛАТТЕРУ

*А.Л. Стельмах, канд. техн. наук, Я.А. Стельмах, А.П. Зиньковский, д-р техн. наук,
Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина*

Постановка задачи. При разработке и вибрационной доводке дозвуковых вентиляторных и компрессорных ступеней газотурбинных двигателей актуальной задачей является оценка устойчивости лопаточного аппарата к решеточному флаттеру с учетом геометрии лопаток и решетки, диапазона рабочих углов атаки и других параметров, определяющих процесс автоколебаний лопаток. Самым сложным этапом при создании методик такой оценки является получение достоверной информации о нестационарных аэродинамических (демпфирующих или возбуждающих) воздействиях на колеблющиеся лопатки в условиях срыва потока, который имеет место при пониженных окружных скоростях вращения осевого компрессора и возникает при высоких как положительных, так отрицательных углах атаки. В зарубежной литературе этот вид флаттера лопаток получил название срывного [1]. Однако в работе [2] отмечается, что в ряде случаев границы срывного флаттера располагаются вблизи режима максимального КПД компрессора, а это свидетельствует о том, что срыв не всегда является основным условием возникновения такого флаттера. Применение классических дозвуковых нестационарных теорий течения [3] к реальным условиям работы двигателей не позволяют обнаружить каких-либо их аэроупругих неустойчивых состояний как при безотрывных, так и срывных дозвуковых течениях, что эквивалентно малым и большим нагрузкам на лопатки соответственно. Однако ввиду очевидного факта возникновения дозвукового флаттера под влиянием высокой нагруженности лопаток постоянно предпринимаются попытки по разработке методики оценки динамической устойчивости лопаточных венцов осевого компрессора. При этом используются как эмпирические и полумпирические подходы на основе экспе-

риментальных данных, полученных на одиночных профилях при больших углах атаки [3], так и теоретические, использующие различные схемы отрывного течения идеальной жидкости [1, 3, 4]. В последнем случае отрыв потока считается основным механизмом возникновения срывного флаттера.

В Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины с использованием плоских решеток лопаточных профилей проведен цикл экспериментальных исследований по изучению аэродемпфирования колебаний лопаток компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) и условий зарождения дозвукового решеточного флаттера в широком диапазоне изменения определяющих характеристик: угла сдвига фаз изгибных, крутильных и изгибно-крутильных колебаний соседних профилей; угла атаки; приведенной частоты колебаний; геометрических параметров профиля и решетки; закона движения лопаточных профилей. Полученные результаты исследований и выявленные закономерности зарождения решеточного флаттера, которые частично опубликованы в работах [5, 6, 7], являются основой предлагаемой методики экспресс-оценки динамической устойчивости консольных лопаток осевых компрессоров АГТД.

Анализ результатов исследования аэродемпфирования колебаний лопаток. Результаты проведенных экспериментальных исследований по изучению аэродемпфирования колебаний лопаток в обобщенном виде могут быть представлены как двухпараметрические зависимости аэродинамического декремента колебаний δ_a от соответствующих характеристик. Как пример на рис. 1 и 2 приведены указанные зависимости для решетки с относительным шагом $\bar{t} = 1$ и углом выноса $\beta = 45^\circ$ при коэффициенте изгибно-

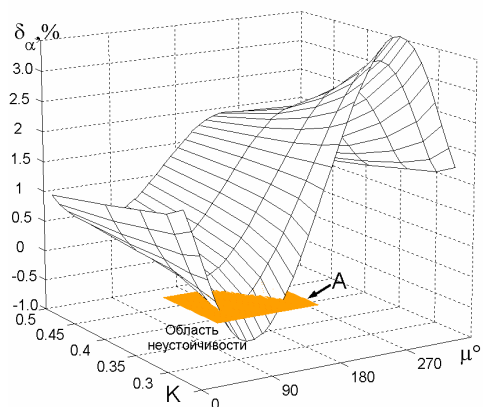


Рис. 1. Зависимость изменения аэродинамического декремента колебаний δ_a лопаток от угла сдвига фаз μ и приведенной частоты K их колебаний

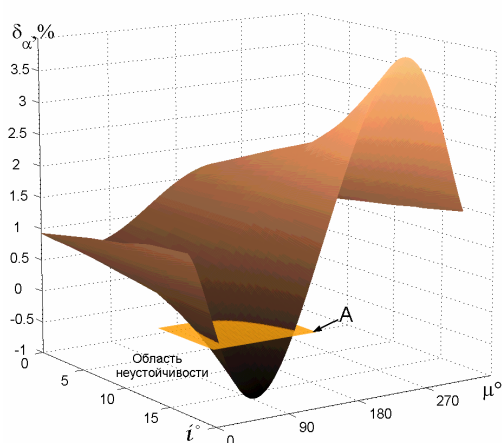


Рис. 2. Зависимость изменения аэродинамического декремента колебаний δ_a лопаток от угла сдвига фаз μ их колебаний и угла атаки i

крутильной связности лопаток 0,26. Анализ результатов проведенных исследований позволил сформулировать следующие закономерности аэродемпфирования колебаний лопаток и зарождения решеточного флаттера:

1. Зависимости аэродинамического декремента колебаний от сдвига фаз колебаний лопаток носят плавный периодичный характер с четко выраженными минимальными и максимальными его значениями.

2. Уменьшение приведенной частоты колебаний при фиксированных углах атаки и геометрических параметрах решетки (относительном шаге и угле выноса) вызывает снижение минимального и возрастание максимального значений декремента колебаний

(см. рис. 1).

3. Независимое увеличение угла атаки приводит к качественно аналогичным эффектам, которые имеют место при уменьшении приведенной частоты колебаний (см. рис. 2).

4. Возможны такие сочетания значений приведенной частоты и угла атаки, при которых декремент колебаний лопаток равняется нулю (плоскость A на рис. 1 и 2). Этому состоянию соответствуют критические значения приведенной частоты колебаний.

5. Независимое уменьшение приведенной частоты колебаний ниже ее критических значений так же, как и увеличение угла атаки при прочих равных условиях, приводит к расширению интервала значений угла сдвига фаз, при котором наблюдается отрицательное аэродемпфирование (аэровозбуждение) колебаний лопаток, и увеличению его уровня (область значений декремента колебаний, расположенных ниже плоскости A на рис. 1 и 2).

6. Для режима обтекания колеблющихся лопаток, который характеризуется аэровозбуждением хотя бы в узком диапазоне углов сдвига фаз колебаний, колебания лопаток с другим сдвигом фазы становятся неустойчивыми и стремятся перестроиться на такие, которые соответствуют максимальной величине отрицательного декремента колебаний.

7. Независимое варьирование геометрических параметров профиля (кривизны, толщины и положений их максимальной относительной величины) и решетки (относительного шага и угла выноса) качественно не влияет на характер зависимости аэродинамического декремента от сдвига фаз колебаний лопаток, а только изменяет критическое значение приведенной частоты.

8. Зависимость критического значения приведенной частоты от угла атаки (как положительных, так и отрицательных его значений) носит монотонно возрастающий характер. Геометрия профиля и решетки, а также закон колебаний лопаток обуславливают только изменение интенсивности нарастания критических значений приведенной частоты [5, 6, 7].

9. Наиболее благоприятные условия для возник-

новения флаттера лопаток имеют место в случае однородного венца, когда колебания лопаток характеризуются одинаковостью сдвига фаз. Расстройка частот лопаток обуславливает различие в углах сдвига фаз их колебаний, вследствие чего при данных приведенной частоте и угле атаки динамическая устойчивость венца повышается. Уменьшение приведенной частоты либо увеличение угла атаки снижает эффект расстройки частот лопаток на повышение динамической устойчивости венца.

10. Массовый критерий, представляющий собой отношение характерной массы жидкости к массе лопатки, на критические значения приведенной частоты колебаний практически не оказывает влияния. Его увеличение приводит только к возрастанию градиента амплитуды колебаний лопаток при снижении приведенной частоты колебаний ниже критического значения.

Основные положения методики. Известно, что решеточный флаттер реализуется преимущественно на низших (первых изгибной и крутильной) формах колебаний лопаток и обуславливается их аэродинамическим взаимодействием. На основе полученных закономерностей аэродемпфирования колебаний лопаток разработана методика экспресс-оценки динамической устойчивости лопаток, которая позволяет выработать рекомендации по исключению возникновения их аэровозбуждения при любом из возможных значений угла сдвига фаз колебаний.

В качестве определяющих устойчивость лопаточного венца принимаются наиболее нагруженные его сечения. Для первых изгибной и крутильной форм колебаний лопаток таковыми являются периферийные сечения, расположенные на 0,75...0,9 их высоты h . Выбор наиболее нагруженного сечения осуществляется путем анализа распределений относительной скорости потока, угла атаки, амплитуд колебаний по высоте лопатки. Такой подход обусловлен тем, что при автоколебаниях лопаток по рассматриваемым формам около 80% подводимой работы от потока приходится примерно на 20% высоты лопаток у их периферии, что практически и предопределяет устой-

чивость всего венца. Поэтому по критическим параметрам, соответствующим выбранному периферийному сечению лопаток и характеризующим устойчивость решетки профилей, можно с большой степенью вероятности прогнозировать динамическую устойчивость венца к флаттеру при колебаниях лопаток по первым изгибной и крутильной формам.

Учитывая изложенное, критерием динамической устойчивости венца для наиболее нагруженных сечений лопаток при различных режимах работы ГТД является выполнение следующего неравенства:

$$K^B \geq K_{cr}.$$

Здесь введены такие обозначения:

$K^B = \omega b / W_1$ - приведенная частота колебаний рассматриваемого лопаточного венца, где ω - круговая частота колебаний лопаток с учетом числа приведенных оборотов венца; b - хорда профиля; W_1 - относительная скорость потока перед лопатками, которые определяются из результатов газодинамического и прочностного расчетов для различных режимов работы ГТД;

$K_{cr} = K(i, \beta, \bar{t}) \cdot K_{\psi} \cdot K(\theta, \bar{c}, \bar{x}_0, \bar{x} \bar{c}) \cdot K_M \cdot K_f \cdot K_{\delta}$ - функционал, устанавливающий критическое значение приведенной частоты рассматриваемого сечения лопаточного венца для различных углов атаки, где $K(i, \beta, \bar{t})$ - функционал, отражающий влияние угла атаки и геометрии решетки (угла выноса и относительного шага) при изгибных либо крутильных колебаниях лопаток относительно центра кручения, расположенного на середине хорды профиля, выбор которого осуществляется из базы данных критических значений приведенной частоты в зависимости от рассматриваемой конфигурации решетки и диапазона рабочих углов атаки; K_{ψ} - коэффициент, учитывающий изгибно-крутильную связность лопатки, т.е. кинематику движения ее периферийного сечения при колебаниях; $K(\theta, \bar{c}, \bar{x}_0, \bar{x} \bar{c})$ - корректирующий функционал, учитывающий влияние геометрических параметров профиля рассматриваемого сечения лопаток: кривизны θ , относительной толщины \bar{c} , положения максимальной кривизны \bar{x}_0 и толщины $\bar{x} \bar{c}$; K_M - коэффициент, учитывающий число Маха; K_f - коэф-

коэффициент, учитывающий повышение устойчивости венца, обусловленное разночастотностью лопаток; K_{δ} -коэффициент, учитывающий механическое демпфирование колебаний, обусловленное рассеянием энергии в материале и в замковом соединении лопаток.

Необходимо отметить, что данный подход к оценке динамической устойчивости лопаточного венца основан на условии, что ее границы соответствуют колебания лопаток решетки с нулевым уровнем аэродемпфирования. Однако на практике за границу устойчивости венца принимаются колебания лопаток, которым соответствует определенный уровень их напряжений, например 50 МПа. Поэтому функционал K_{cr} должен быть дополнен коэффициентом $K_{\bar{m}}$, учитывающим влияние на градиент нарастания амплитуды колебаний при снижении приведенной частоты ниже критической массового критерия $\bar{m} = \rho_V b^2 / \rho_L F$, где ρ_V - плотность газа, ρ_L - плотность материала лопатки, F - площадь сечения лопатки.

Примеры оценки границы устойчивости лопаточных венцов. Рассмотрим возможность применения предложенной методики для определения динамической устойчивости лопаток 1-й ступени компрессора высокого давления (КВД) современного АГТД. Данные, полученные в процессе его доводки, указывали на аэродинамическую природу возбуждения их колебаний. При этом в замковой части рабочих лопаток систематически возникали трещины, одной из возможных причин появления которых могла быть потеря динамической устойчивости лопаточного венца, обусловленная дозвуковым решеточным флаттером и возникающая на переходных режимах эксплуатации АГТД. В целях предотвращения возможных автоколебаний были внесены конструктивные изменения, заключающиеся в закрутке на 5° периферийной части лопаток. Это привело к снижению максимальных рабочих углов атаки периферийных сечений лопаток, однако не устранило возникающий дефект. На рис. 3 изображены границы динамической устойчивости (линии) и четыре наиболее неблагоприятных режима работы (маркеры) венца при первой изгибной форме колебаний лопаток, рассчитанные для сечений

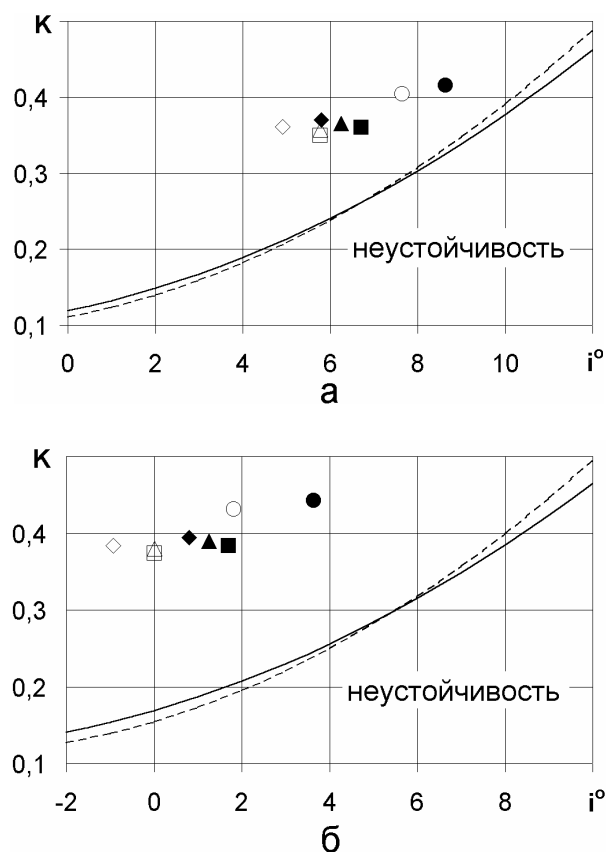


Рис. 3. Границы устойчивости и режимы работы 1-й ступени КВД для первой изгибной формы колебаний до (а) и после (б) дополнительной закрутки лопаток

0,75h (сплошные линии и темные маркеры) и 0,9h (пунктирные линии и светлые маркеры) лопаток.

На рис. 4 представлены аналогичные результаты при первой крутильной форме колебаний лопаток, рассчитанные для сечения 0,9h как наиболее неблагоприятного в данном случае.

Как видно из приведенных результатов, рассматриваемые режимы эксплуатации как для изгибной, так и для крутильной форм колебаний находятся в области устойчивости. Кроме того, закрутка периферийной части лопаток приводит к излишнему повышению устойчивости лопаточного венца по условию возникновения решеточного флаттера для рассмотренных форм колебаний лопаток.

Далее рассмотрим пример оценки устойчивости первой изгибной формы колебаний лопаток 1-й ступени КВД для различных режимов работы АГТД, результаты которой представлены на рис. 5. Здесь вертикально расположенные маркеры соответствуют

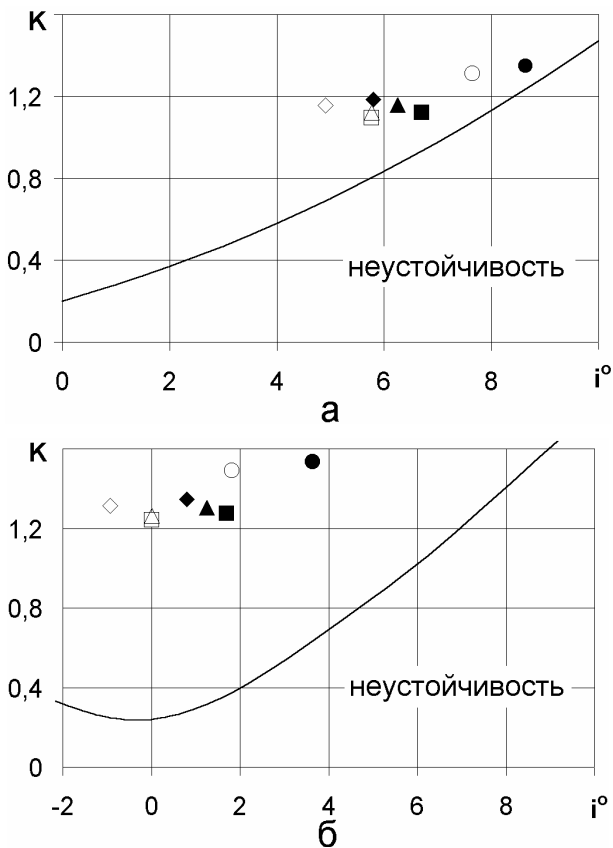


Рис. 4. Границы устойчивости и режимы работы 1-й ступени КВД для крутильной формы колебаний до (а) и после (б) дополнительной закрутки лопаток

режимам работы лопаточного венца, рассчитанным для сечений 0,75h (нижний) и 0,9h (верхний) лопаток, а граница устойчивости нанесена только для сечения 0,9h. Видно, что режимы работы, отмеченные темными маркерами, находятся в области неустойчивости, где при стендовых испытаниях компрессора и наблюдался флаттер данного лопаточного венца.

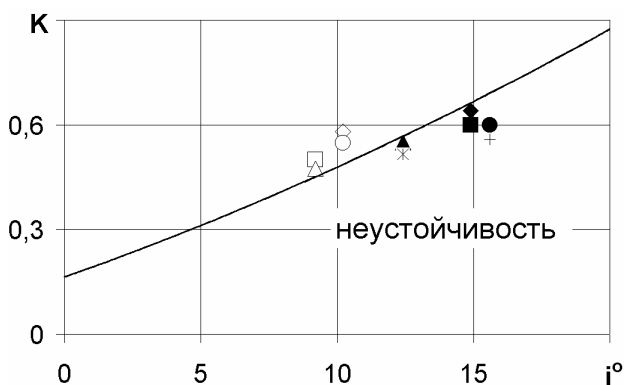


Рис. 5. Граница устойчивости и режимы работы 1-й ступени КВД для первой изгибной формы колебаний лопаток

Выводы. Разработанная методика прогнозирования позволяет проводить экспресс-оценку динамической устойчивости венцов осевого компрессора к дозвуковому решеточному флаттеру при первых изгибной и крутильной формах колебаний консольных лопаток в диапазоне углов атаки $i = -10 \dots 20^\circ$ и геометрических параметров решетки: $\bar{t} = 0,7 \dots 1,3$ и $\beta = 0 \dots 60^\circ$ с учетом геометрии периферийных сечений лопаток, разночастотности лопаток, числа Маха, механического демпфирования колебаний и массового критерия. Методика может использоваться как на ранней стадии проектирования, так и доводки ГТД.

Литература

1. Гостелову Дж. Аэродинамика решеток турбомашин.- М: Мир, 1987.- 391 с.
2. Advances in fan and compressor blade flutter analysis and predictions / A.A. Mikolajczak, R.A. Arnoldi, L.E. Snyder, H. Stargardter // AAIA Journal of Aircraft.- 1975.- 12, № 4.- P. 325-332.
3. Цзи, Сринивасан. Некоторые последние достижения в изучении природы срывного флаттера в турбомашинах // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Энергетические машины и установки.- 1985.- Т. 107, № 2.- С. 113-124.
4. Богомолов С. Б., Сарен В.Э. Решетка профилей вибрирующих в отрывном несжимаемом потоке. // Аэроупругость лопаток турбомашин.- М.: ЦИАМ, 1991.- С. 57-78. (Тр. ЦИАМ, N 1293).
5. Стельмах А.Л. Аэродемпфирование и устойчивость вентиляторных и компрессорных решеток в условиях безотрывного и срывного обтекания // Вибрация в технике и технологиях: Сб. науч. тр.- К.; 1999.- № 1(10).- С. 45-51.
6. Стельмах А.Л., Каминер А.А. Влияние геометрических параметров решетки на границу изгибных автоколебаний лопаток, обусловленных решеточным флаттером // Проблемы прочности.- 1983.- № 1.- С. 84-88.
7. Лен А.Д., Каминер А.А., Стельмах А.Л. Потеря динамической устойчивости крутильных колебаний лопаток, обусловленная решеточным флаттером // Проблемы прочности.- 1986.- № 1.- С. 73-77.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Б.А. Грязнов, Институт проблем прочности НАН Украины, г. Киев; канд. техн. наук, доцент А.М. Грушенко, Национальный аэрокосмический университет, г. Харьков.