

УДК.621.515/62-752

С. Н. КАБАННИК

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭКСПРЕСС - ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ К ДОЗВУКОВОМУ РЕШЕТОЧНОМУ ФЛАТТЕРУ ДЛЯ ИЗГИБНОЙ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Приведено краткое содержание метода экспресс - оценки аэродинамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру и примеры применения разработанной программы для изгибной формы колебаний рабочих лопаток осевых компрессоров авиационных газотурбинных двигателей при различных их режимах эксплуатации. Рабочий диапазон изменяемых параметров, который заложен в программе, позволяет проводить оценку аэродинамической устойчивости при: угле атаки $-15...20^\circ$; относительном шаге решеток $0,65...1,35$; угле выноса решеток $0...65^\circ$; коэффициенте изгибно-крутильной связности лопаток $0...0,5$.

Ключевые слова: дозвуковой решеточный флаттер, лопатка, профиль, форма колебаний, осевой компрессор, авиационный газотурбинный двигатель, граница динамической устойчивости.

Постановка задачи

Современные тенденции в проектировании авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) характеризуются снижением габаритов и массы при одновременном росте нагруженности рабочих лопаток осевых компрессоров, что приводит к большой вероятности появления их автоколебаний (флаттера). Для обеспечения надежного функционирования компрессоров актуальной задачей является прогнозирование условий возникновения таких режимов их эксплуатации уже на ранней стадии проектирования, что обуславливает необходимость создания методики оценок аэродинамической устойчивости к флаттеру рабочих лопаток. Возможный подход к решению этой задачи рассмотрен в [1].

В работе [2] была предложена методика экспресс - оценки устойчивости лопаточных венцов к дозвуковому решеточному флаттеру, которая может использоваться на ранней стадии проектирования АГТД. Она основывается на базе данных критических условий зарождения дозвукового решеточного флаттера, полученных в результате экспериментальных исследований аэродемпфирования и аэровозбуждения прямых решеточных профилей, которые проводились в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины в широком диапазоне изменения угла атаки, приведенной частоты колебаний профилей, угла сдвига фаз их изгибных, крутильных и изгибно-крутильных колебаний, геометрии решетки. Алгоритм решения задачи определения границы аэродинамической устойчивости лопаточных венцов с использованием

указанной методики изложен в [1].

Цель настоящей работы состоит в реализации метода экспресс - оценки прогнозирования устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру на примере компрессорных венцов двигателя ТВ3-117-СБМ1 с использованием разработанного алгоритма.

1. Основные положения метода

Поскольку решеточный флаттер реализуется в основном на низших (первых изгибной и крутильной) формах колебаний лопаток, в качестве определяющих устойчивость лопаточного венца принимаются наиболее нагруженные периферийные его сечения, расположенные на $0,75...0,95$ высоты h лопаток (рис. 1).

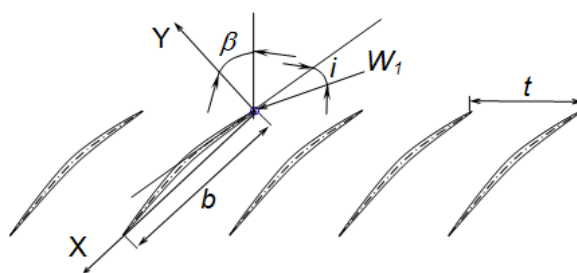


Рис. 1. Модель прямой решетки лопаточных профилей

Условие устойчивости лопаточного венца можно записать как

$$K^B \geq K_{кр}^{\cdot} \quad (1)$$

Здесь $K^B = \omega b / W_1$ - 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, $K'_{кр} = K_{кр}(i, \beta, \bar{t}, \psi) \cdot K(\theta, \bar{c}, \bar{x}_\theta, \bar{x} \bar{c}) \cdot K_M \cdot K_f \cdot K_\delta$ - функционал, устанавливающий критическое значение приведенной частоты рассматриваемого сечения лопаточного венца для различных углов атаки, где $K(i, \beta, \bar{t}, \psi)$ - функционал, отражающий влияние угла атаки и геометрии решетки (угла выноса и относительного шага) коэффициента изгибно-крутильной связности лопатки; $K(\theta, \bar{c}, \bar{x}_\theta, \bar{x} \bar{c})$ - корректирующий функционал, учитывающий влияние геометрических параметров профиля рассматриваемого сечения лопаток: кривизны θ , относительной толщины \bar{c} , положения максимальной кривизны \bar{x}_θ и толщины $\bar{x} \bar{c}$; K_M, K_f, K_δ - коэффициенты, учитывающие соответственно число Маха; повышение устойчивости венца, обусловленное разночастотностью лопаток, механическое демпфирование колебаний, обусловленное рассеянием энергии в материале и в замковом соединении лопаток.

2. Математическая реализация методики

Для определения функционала $K_{кр}(i, \beta, \bar{t}, \psi)$ была разработана база данных критических значений приведенной частоты колебаний $K_{кр}$ лопаток для разных значений относительного шага $\bar{t} = t/b$, угла выноса β , угла атаки i , коэффициента изгибно-крутильной связности лопатки $\psi = (a_1 - a_2) / (a_1 + a_2)$, где a_1 и a_2 - амплитуды колебаний соответственно передней и задней кромок лопаточного профиля. База данных критических значений разрабатывалась на основе результатов нестационарных испытаний прямых компрессорных решеток, пример которой для изгибной формы колебаний лопаток приведен в [1]. Следует отметить, что при этом использовались как данные графической интерполяции экспериментальных зависимостей минимальных значений аэродинамического декремента от приведенной частоты колебаний $\delta_{a \min} = f(K)$ для различных углов атаки, так и результаты расчетов энергетическим методом на основе экспериментально полученных аэродинамических коэффициентов влияния лопаток прямых решеток.

На основе сформированной базы данных критических значений приведенной частоты было раз-

работано уравнение множественной регрессии в виде

$$[K_{кр}] = [F][S]. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } [F] = \begin{bmatrix} f_{01} & f_{11} & \dots & f_{k1} \\ f_{02} & f_{12} & \dots & f_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{0N} & f_{1N} & \dots & f_{kN} \end{bmatrix}; [S] = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \dots \\ s_k \end{bmatrix}; [K_{кр}] = \begin{bmatrix} K_{кр1} \\ K_{кр2} \\ \dots \\ K_{крN} \end{bmatrix},$$

где $[F]$ - регрессионная матрица, f_{pq} ($p=0 \dots k$; $q=1 \dots N$) - регрессоры, выбранные на основе ортогональных полиномов Чебышева;

$[S]$ - вектор-столбец k определяемых коэффициентов регрессии s_p ;

$[K_{кр}]$ - вектор-столбец, построенный на основе базы данных используемых N критических значений приведенной частоты колебаний $K_{кр}$.

После соответствующих преобразований уравнение множественной регрессии может быть представлено как

$$K_{кр} = s_0 + s_1^{(1)} f_1^{(1)}(x_1) + \dots + s_1^{(A_1-1)} f_1^{(A_1-1)}(x_1) + s_j^{(1)} f_j^{(1)}(x_j) + \dots + s_j^{(A_j-1)} f_j^{(A_j-1)}(x_j) + \Pi, \quad (3)$$

где $s_1^{(1)} f_1^{(1)}(x_1), \dots, s_j^{(1)} f_j^{(1)}(x_j)$ - полином первого порядка при варьировании факторов x_{jq} ;

$s_j^{(A_j-1)} f_j^{(A_j-1)}(x_j)$ - полином (A_j-1) порядка при варьировании факторов x_{jq} ;

Π - условное обозначение перемножений функций f_l на f_g , где $l=1 \dots j, g=1 \dots j, l \neq g$.

3. Результаты применения алгоритма экспресс-оценки устойчивости для изгибной формы колебаний лопаточных венцов

На основании полученного уравнения множественной регрессии была разработана программа экспресс-оценки устойчивости лопаточного венца к дозвуковому решеточному флаттеру для первой изгибной формы колебаний лопаток. Рассмотрим результаты её реализации на примере оценки устойчивости лопаточных венцов осевых компрессоров АГТД ТВ3-117-СБМ1 к дозвуковому решеточному флаттеру при различных режимах их эксплуатации.

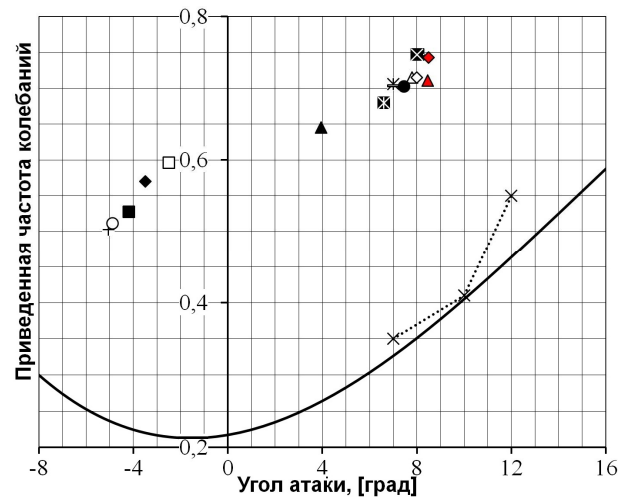
Для проведения расчетов был выбран профиль, параметры которого близки к периферийным сечениям рассматриваемых лопаточных венцов, а именно: кривизну $\theta = 15^\circ$, относительную толщину и

кривизну 4,5%, положение максимальной толщины x_c и кривизны x_f относительно передней кромки профиля располагались на 0,45b. При этом профиль имеет острые переднюю и заднюю кромки. Вследствие этого коэффициенты K_M , K_B , K_δ и $K(\theta, \bar{c}, \bar{x}_\theta, \bar{x}_c)$, учитывающие геометрию профиля в периферийном сечении, функционалам $K_{кр}$ были приняты равными единице.

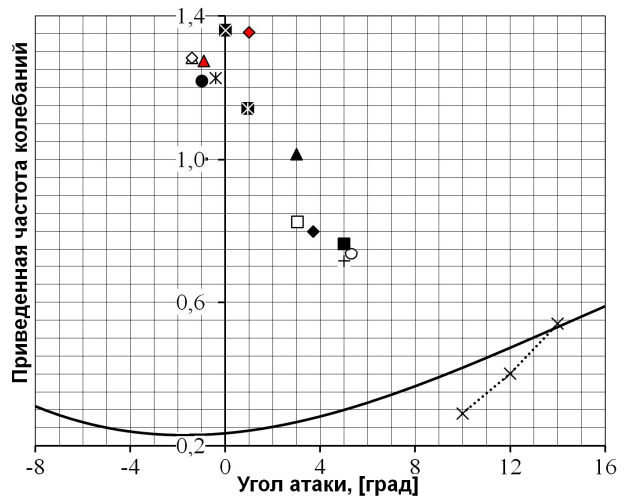
Рассмотрим результаты проверки устойчивости лопаточных венцов первой и второй ступени компрессора при различных режимах работы АГТД ТВ3-117-СБМ1. Оценка динамической устойчивости объектов исследования была проведена в широком диапазоне режимов эксплуатации двигателя. Исходные значения относительной скорости потока, углов атаки, частот колебаний лопаток (с учетом приведенного числа оборотов компрессора для каждого из режимов эксплуатации) были взяты из газодинамических расчетов и расчетов на прочность соответствующих ступеней.

На рис. 2 представлены результаты оценки динамической стойкости лопаточных венцов первой и второй ступени компрессора к дозвуковому решеточному флаттеру при различных режимах работы АГТД: промежуточный чрезвычайный ($H=0m$) (+), максимально продолжительный ($H=6000m$) (o), взлетный режим ($H=0m$) (■), максимально продолжительный ($H=0m$) (◆), максимальное число Маха ($H=0m$) (□), 0,4 максимально продолжительного ($H=400m$) (▲), 85% расчетной частоты вращения ($H=0m$) (⊠), полетный малый газ ($H=6000m$) (●), полетный малый газ ($H=0m$) (▲), земной малый газ ($H=0m$) (◆), полетный малый газ ($H=6000m$) (ж), полетный малый газ ($H=0m$) (◇), земной малый газ ($H=0m$) (⊕), полетный малый газ ($H=6000m$) (-), полетный малый газ ($H=0m$) (Δ), земной малый газ ($H=0m$) (⊗), где H – высота полета. Здесь также приведены результаты экспериментальных исследований [3]. В данном примере в качестве определяющих принимались сечения на 0,9h высоты лопаток, что соответствовало параметрам относительного шага и угла выноса решетки для первой ступени $t/b=0,933$ и $\beta=50,79^\circ$ и второй – $t/b=0,835$ и $\beta=45,44^\circ$. При этом кривизна лопаточных профилей ступеней была соответственно $\theta_1=23,95^\circ$ и $\theta_2=19,36^\circ$. Коэффициент изгибно - крутильной связности ψ для первой формы колебаний был принят для первой степени равным 0,1285, а второй - 0,135.

Видно, что экспериментальные значения критической приведенной частоты при угле атаки $i=12^\circ$ для первой ступени (рис. 2а) существенно превышает значение, полученное экспресс-методом. Это обуславливается развитым срывным обтеканием лопаток из-за высокой кривизны лопаточных профилей.



а



б

Рис. 2. Граница динамической устойчивости и режимы работы первой (а) и второй (б) ступени компрессора низкого давления: сплошные линии – метод экспресс – оценки; штриховые – экспериментальные данные

Из полученных результатов прогнозирования границ стойкости к решеточному флаттеру рассмотренных лопаточных венцов следует.

1. Лопаточные венцы 1-й и 2-й ступеней компрессора имеют значительный запас стойкости к дозвуковому решеточному флаттеру при первой форме колебаний лопаток для рассмотренных режимов работы двигателя.

2. Рабочие лопатки допускают либо повысить углы атаки в периферийной части их пера и, тем самым, поднять степень повышения давления, либо снизить их собственные частоты колебаний, что приведет к уменьшению веса ступени.

Выводы

1. Приведено описание метода экспресс-оценки устойчивости и пример применения разработанного алгоритма его реализации для изгибной формы колебаний рабочих лопаток осевых компрессоров, позволяющие на ранней стадии проектирования авиационных газотурбинных двигателей наряду с газодинамическими и прочностными расчетами проводить оценку их устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру.

2. Показано, что разработанный алгоритм реализации метода экспресс-оценки прогнозирования возникновения дозвукового решеточного флаттера позволяет осуществлять оптимальный выбор значений приведенной частоты колебаний лопаток и рабочих углов атаки при заданной геометрии периферийных сечений лопаточных венцов эксплуатации двигателя.

Литература

1. Кабанник, С. Н. Алгоритм реализации метода экспресс – оценки устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру лопаточных венцов компрессоров [Текст] / С. Н. Кабанник, А. Л. Стельмах, А. П. Зиньковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 8 (115). – С. 131–137.
2. Стельмах, А. Л. Методика экспресс - оценки динамической устойчивости компрессорных лопаток газотурбинного двигателя к дозвуковому решеточному флаттеру [Текст] / А. Л. Стельмах, Я. А. Стельмах, А. П. Зиньковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 5(40). – С. 71-75.
3. Оценка динамической устойчивости лопаточных венцов рабочих колес компрессора ГТД [Текст] / В. И. Колесников, В. А. Цимбалюк, А. Л. Стельмах [и др.] // *Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій : тр. Міжнар. конф. 6-9 червня 2000 р., Київ*. – К. : Логос, 2000. – Т. 2. – С. 801-806.

Поступила в редакцию 5.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю. М. Терещенко, Национальный авиационный университет, Киев.

РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДА ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ДО ДОЗВУКОВОГО РЕШІТКОВОГО ФЛАТЕРУ ДЛЯ ЗГІНАЛЬНОЇ ФОРМИ КОЛІВАНЬ ЛОПАТКОВИХ ВІНЦІВ ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРИВ ГТД

С. М. Кабанник

Приведено короткий зміст методу експрес – оцінки аеродинамічної стійкості до дозвукового решіткового флаттеру і приклади застосування розробленої програми для згинальної форми коливань робочих лопаток осьових компресорів авіаційних газотурбінних двигунів при різних режимах їх експлуатації. Робочий діапазон змінних параметрів, який закладено в програмі, дозволяє проводити оцінку аеродинамічної стійкості для: кутів атаки $-15 \dots 20^\circ$; відносного кроку решіток $0,65 \dots 1,35$; кутів виносу решіток $0 \dots 65^\circ$; коефіцієнту згинально - крутильної зв'язності лопаток $0 \dots 0,5$.

Ключові слова: дозвуковий флатер, лопатка, форма коливань, осьовий компресор, авіаційний газотурбінний двигун, границя динамічної стійкості.

IMPLEMENTATION OF THE EXPRESS METHOD FOR EVALUATION OF STABILITY OF FLEXURAL MODE OF GTE AXIAL COMPRESSOR BLADING AGAINST SUBSONIC FLUTTER

S. M. Kabannik

A summary of the express-method of evaluation of aerodynamic stability against subsonic flutter and examples of application of the developed program for flexural mode of vibrations of aircraft gas-turbine engine axial compressor blades for various modes of operation are presented. An operating range of variable parameters embedded in the program allows the evaluation of the aerodynamic stability for: angle of attack is $15-20^\circ$; relative cascade spacing is $0.65-1.35$; cascade stagger angle is $0-65^\circ$; coefficient of flexural-torsional coupling of blade is $0-0.5$.

Keywords: subsonic flatter, blade, blade, mode of vibrations, axial compressor, aircraft gas-turbine engine, dynamic stability boundary.

Кабанник Сергей Николаевич – аспирант, отдел колебаний и вибрационной надежности, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, e-mail: kabannyk@ukr.net.