

А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ, А. Л. СТЕЛЬМАХ, С. Н. КАБАННИК*Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина*

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ К ДОЗВУКОВОМУ ФЛАТТЕРУ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ КОМПРЕССОРОВ НЕКОТОРЫХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе представлены результаты исследований по верификации экспресс-метода прогнозирования динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру на примере лопаточных венцов отдельных ступеней компрессора некоторых типов авиационных газотурбинных двигателей при различных режимах их эксплуатации. Приведено краткое изложение основных положений разработанного экспресс-метода, возможности программы определения границы устойчивости лопаточных венцов к дозвуковому решеточному флаттеру, а также результаты оценки динамической устойчивости компрессорных ступеней ряда современных авиационных газотурбинных двигателей. На основании полученных данных исследований установлено следующее. Во-первых, приведенные частоты колебаний исследованных лопаточных венцов и критические их значения, определенные на основании данных испытаний прямых решеток лопаточных профилей, соответствующим двум периферийным сечениям по высоте пера лопаток, практически совпадают, что означает возможность решения задачи, используя только газодинамические параметры потока для одного из периферийных сечений пера в заданном диапазоне его высоты. Во-вторых, на примере прогнозирования динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру лопаточных венцов отдельных ступеней компрессоров некоторых типов авиационных газотурбинных двигателей и сравнения полученных результатов с данными стендовых испытаний и полученных с использованием других методов (собственных значений и энергетического), показано, что разработанный метод позволяет с высокой степенью достоверности устанавливать границу флаттера, а также осуществлять оптимальный выбор значений приведенной частоты колебаний лопаток для заданного рабочего диапазона угла атаки периферийных сечений лопаточных венцов по условию его возникновения. В-третьих, на примере анализа образования трещин в замковой части рабочих лопаток первой ступени компрессора высокого давления одного из авиационных газотурбинных двигателей рассмотрена возможность определения природы возбуждения колебаний для лопаточных венцов, а также дана оценка проведенных мероприятий при их устранении. Кроме того, показано, что при больших углах атаки ($\geq 10^\circ$) может происходить значительное смещение границы динамической устойчивости лопаточных венцов в сторону больших значений приведенной частоты их колебаний.

Ключевые слова: лопаточный венец; профиль; осевой компрессор; авиационный газотурбинный двигатель; дозвуковой решеточный флаттер; граница динамической устойчивости; угол атаки; приведенная частота колебаний.

Постановка задачи

Одной из актуальных задач при создании авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) остается прогнозирование границы устойчивости лопаточного аппарата компрессорных и вентиляторных ступеней к дозвуковому флаттеру на возможных режимах их эксплуатации уже на ранней стадии проектирования двигателя. Первоочередным этапом при разработке методики решения этой задачи является создание достоверной расчетной модели оценки динамической устойчивости лопаточных венцов. Это обусловлено тем, что неправильное определение ее границы на этапе эскизного проектирования венцов может повлечь значительные материальные

и временные затраты, связанные с перепроектированием, экспериментальной проверкой и доводкой в составе полноразмерного АГТД.

Для решения такой задачи в работе [1] был предложен экспресс-метод прогнозирования динамической устойчивости лопаточных венцов к дозвуковому флаттеру, а в [2] – алгоритм его реализации. Это стало возможным благодаря результатам проведенных в Институте проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины комплексных экспериментально-расчетных исследований аэродемпфирования и аэровозбуждения рабочих лопаток компрессорных ступеней ряда современных АГТД [3-5].

Целью данной работы является верификация

экспресс-метода прогнозирования устойчивости к дозвуковому флаттеру на примере лопаточных венцов отдельных ступеней компрессоров некоторых типов АГТД на различных режимах их эксплуатации.

Основные положения экспресс-метода

В полном объеме разработанный экспресс-метод прогнозирования динамической устойчивости лопаточных венцов компрессорных и вентиляторных ступеней АГТД к дозвуковому решеточному флаттеру изложен в [1, 2, 6]. Здесь, в соответствии с постановкой задачи, остановимся лишь на его основных положениях.

Критерием динамической устойчивости венца является выполнение для наиболее нагруженных сечений пера лопаток при различных режимах работы АГТД неравенства

$$K^B \geq K_{кр}, \quad (1)$$

где $K^B = \frac{\omega b}{V_1}$ – приведенная частота колебаний рассматриваемого лопаточного венца; $K_{кр}$ – критическое значение приведенной частоты колебаний лопаточного профиля, соответствующего рассматриваемому сечению венца при различных углах атаки; V_1 – скорость набегающего потока; ω – угловая частота колебаний лопатки; b – хорда периферийного сечения лопатки.

Критическое значение приведенной частоты колебаний, которое определяет границу динамической устойчивости венца, представляется в виде функционала

$$K_{кр} = K(i, \beta, \bar{t}, \psi) \cdot K(\varepsilon, \bar{c}, \bar{x}_\varepsilon, \bar{x}_{\bar{c}}) \cdot K_M K_f K_\delta, \quad (2)$$

где $K(i, \beta, \bar{t}, \psi)$ – функционал, отражающий влияние угла атаки i и геометрии решетки (угла выноса β и относительного шага $\bar{t} = \frac{t}{b}$) при изгибных либо

крутильных колебаниях лопаток; $\psi = \frac{a_n - a_z}{a_n + a_z}$ –

коэффициент изгибно-крутильной связанности лопатки, определяющий кинематику движения ее периферийного сечения при колебаниях; a_n, a_z – амплитуды перемещений передней и задней кромок профиля соответственно; $K(\varepsilon, \bar{c}, \bar{x}_\varepsilon, \bar{x}_{\bar{c}})$ – корректирующий функционал, учитывающий влияние геометрических параметров профиля: кривизны ε , относительной толщины $\bar{c}$, положения максимальной кривизны $\bar{x}_\varepsilon$ и толщины $\bar{x}_{\bar{c}}$; K_M, K_f, K_δ – коэффициенты, учитывающие влияние числа Маха,

разночастотности лопаток и механического демпфирования колебаний лопаток вследствие рассеяния энергии в материале и замковом соединении соответственно.

Определяющим моментом экспресс-метода является выбор функционала $K(i, \beta, \bar{t}, \psi)$, который осуществляется на основе экспериментальной базы данных критических значений $K_{кр}$ приведенной частоты колебаний прямых компрессорных решеток (рис. 1), полученных при фиксированных геометрических их параметрах: относительного шага $\bar{t}$ и угла выноса β для заданных угла атаки i и коэффициента изгибно-крутильной связности лопатки ψ .

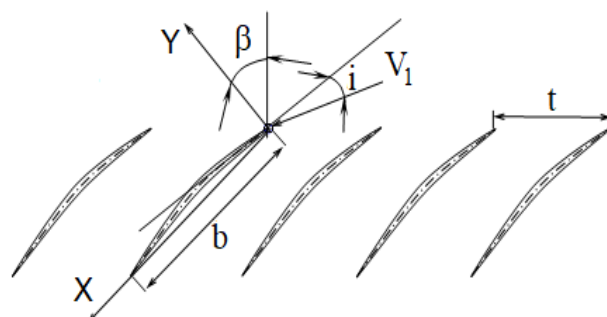


Рис. 1. Схема прямой решетки лопаточных профилей

Программа определения границы устойчивости лопаточных венцов к дозвуковому решеточному флаттеру

Была разработана программа реализации экспресс-метода прогнозирования динамической устойчивости для первой изгибной формы колебаний лопаточных венцов осевых компрессоров в диапазоне угла атаки $-10 \dots 20^\circ$, позволяющая на ранней стадии проектирования АГТД проводить оценку их устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру [7]. Она может использоваться для оценки устойчивости первой изгибной формы колебаний лопаток компрессоров и вентиляторов в диапазоне значений относительного шага $\bar{t} = 0,6 \dots 1,4$, угла выноса решетки $\beta = 0 \dots 65^\circ$ и коэффициента изгибно-крутильной связности $\psi = 0 \dots 0,5$.

Результаты исследований

Рассмотрим возможности применения разработанных экспресс-метода и программы его реализации на примере оценки динамической устойчивости к дозвуковому флаттеру лопаточных венцов отдельных ступеней компрессоров низкого (КНД) и высокого (КВД) давлений некоторых типов АГТД. Все

результаты исследований получены для случая первой изгибной формы колебаний лопаток.

1. Сравнение результатов расчетной границы динамической устойчивости лопаточного венца 1-й ступени КНД АГТД Д-36 с данными стендовых испытаний.

При натурных испытаниях АГТД Д-36 наблюдался решеточный флаттер лопаток 1-й ступени его КНД. Поэтому с использованием разработанного экспресс-метода выполнены расчеты по определению критических значений приведенной частоты колебаний указанного лопаточного венца. Результаты расчетных исследований представлены на рис. 2. Вертикально расположенные маркеры соответствуют значениям критической приведенной частоты колебаний лопаточного венца на данном режиме эксплуатации двигателя, характеризующегося углом атаки. Их расчет осуществлялся для сечений 0,75 (нижний маркер) и 0,95 (верхний) высоты пера лопатки.

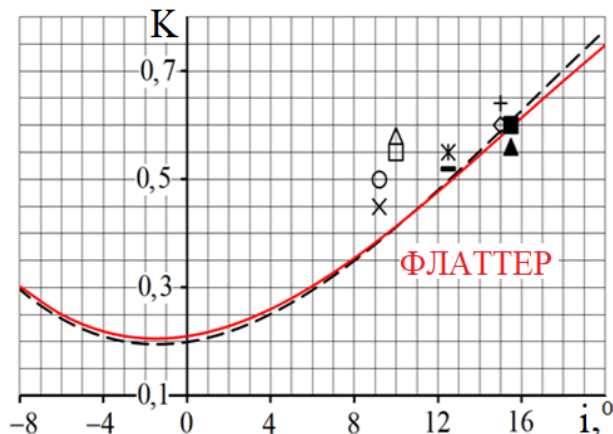


Рис. 2. Расчетные зависимости критической приведенной частоты колебаний от угла атаки лопаточного венца 1-й ступени КНД АГТД Д-36, определенным по данным испытания прямых решеток профилей, соответствующих 0,75 (сплошная линия) и 0,95 (штриховая) высоты пера. Маркеры – значения приведенной частоты колебаний венца для режимов эксплуатации двигателя

Расчеты проводились на основании данных испытаний прямых решеток профилей, соответствующих выбранным сечениям пера лопаток рассматриваемого венца и которые характеризуются такими геометрическими параметрами: сечение 0,75 – $\bar{t} = 1,044$; $\beta = 48,1^\circ$ и сечение 0,95 – $\bar{t} = 1,123$; $\beta = 52,7^\circ$ при $\psi = 0,255$.

Анализ представленных результатов исследований показывает, что режимы работы, отмеченные темными маркерами, находятся ниже границы ди-

намической устойчивости, т.е. в области флаттера, где при стендовых испытаниях двигателя и наблюдался дозвуковой решеточный флаттер рассматриваемого лопаточного венца, что свидетельствует о работоспособности метода.

2. Оценка устойчивости к дозвуковому флаттеру лопаточных венцов КНД и КВД АГТД АИ-25.

Для расчета критических значений $K_{кр}$ приведенной частоты колебаний рассматриваемых лопаточных венцов были также выбраны сечения на 0,75 и 0,95 высоты пера лопаток венца.

По результатам проведенных расчетов для лопаточных венцов рассматриваемых ступеней компрессоров исследуемого АГТД были определены значения приведенной частоты колебаний $K^B_{0,75}$ и $K^B_{0,95}$ (светлые маркеры), а также её критические значения $K_{кр}^{0,75}$ и $K_{кр}^{0,95}$ (темные), которые представлены в виде диаграмм на рис. 3.

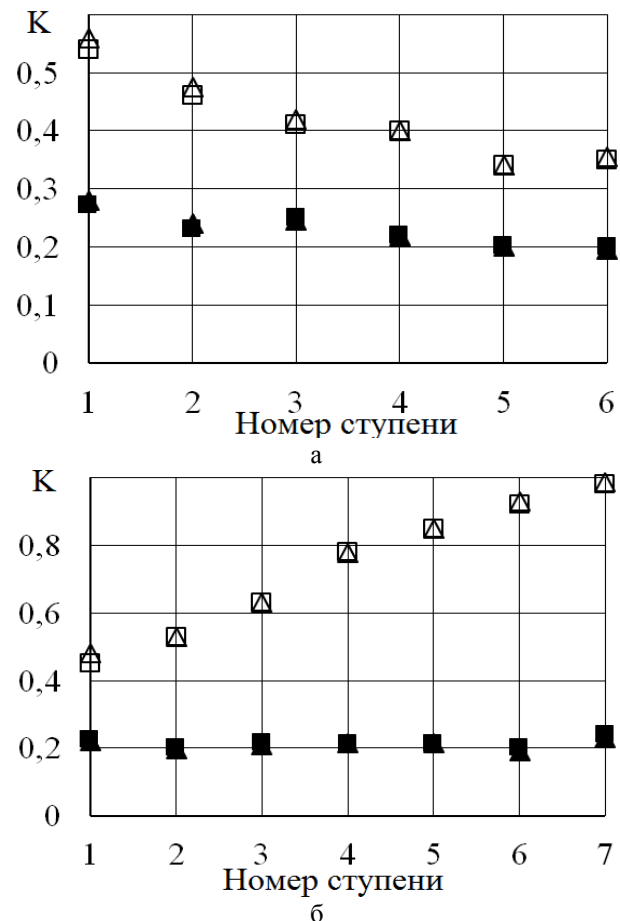


Рис. 3. Диаграмма значений приведенной частоты колебаний K^B лопаточных венцов (светлые маркеры) и её критических значений $K_{кр}$ (темные), соответствующие сечениям 0,75 (Δ , $\blacktriangle$) и 0,95 ($\square$, $\blacksquare$) высоты пера лопаток ступеней КНД (а) и КВД (б) давлений АГТД АИ-25

Как следует из приведенных данных, во-первых, значения приведенной частоты колебаний K^B и её критического значения $K_{кр}$, полученные с использованием прямых решеток лопаточных профилей, соответствующих двум периферийным сечениям по высоте пера, как и в предыдущем случае, практически совпадают. Это означает, что решение задачи по прогнозированию динамической устойчивости лопаточных венцов можно проводить, используя газодинамические параметры потока для любого из периферийных сечений пера лопатки в указанном диапазоне её высоты. Во-вторых, значения приведенной частоты колебаний венцов, соответствующие режимам их эксплуатации, существенно превышают их критические значения, что позволяет констатировать о существенном запасе их динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру.

3. Проверка динамической устойчивости лопаточного венца 2-й ступени компрессора АГТД ТВ3-117ВМА-СБМ1 при различных режимах эксплуатации.

В [8] изложены основные положения экспериментально-расчетного комплекса, который позволяет достоверно определить аэродинамические нагрузки (силы и моменты) на рабочих лопатках и на их основе, используя метод собственных значений, произвести прогнозирование динамической устойчивости к флаттеру венцов в широком диапазоне изменения значений их механических параметров и характеристик газового потока. Поэтому представляет практический интерес сравнение данных такого прогнозирования с полученными экспресс-методом. Решение этой задачи было проведено на примере 2-й ступени компрессора АГТД ТВ3-117ВМА-СБМ1, результаты которого в полном объеме представлены в [9], а здесь приводятся только в соответствии с постановкой данной работы.

Были определены зависимости критических значений $K_{кр}$ приведенной частоты колебаний от угла атаки i , полученные для выбранного венца с использованием метода собственных значений [9], а также на основе экспресс-метода прогнозирования динамической устойчивости лопаточных венцов [7], которые приведены на рис. 4. Здесь также показана аналогичная зависимость, определенная энергетическим методом [5].

Рассмотрение представленных данных позволяет сделать такие выводы.

Во-первых, подтверждаются выводы, сделанные в [5, 9], что режимы эксплуатации исследуемого лопаточного венца находятся в устойчивой области на значительном отдалении от критических значений приведенной частоты колебаний, что свиде-

тельствует о значительном запасе его динамической устойчивости в широком диапазоне изменения угла атаки.

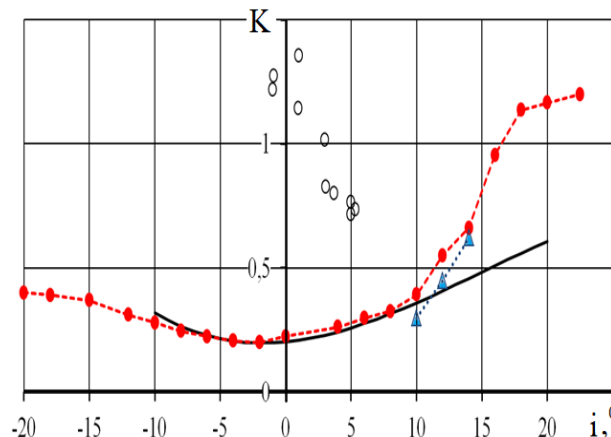


Рис. 4. Зависимость критических значений приведенной частоты колебаний лопаток 2 – й ступени компрессора двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1 от угла атаки, полученные с использованием метода собственных значений (пунктирная линия), экспресс-метода (сплошная) и энергетического метода (штриховая). Маркерами – значения приведенной частоты колебаний для режимов эксплуатации двигателя

Во-вторых, для малых значений угла атаки установленная граница динамической устойчивости хорошо согласуется с данными, полученными в [7].

В-третьих, при больших положительных углах атаки граница динамической устойчивости смещается в сторону больших значений приведенной частоты колебаний. Особенно её рост наблюдается после достижения угла атаки 14° , где взаимосвязь лопаток через поток проходит в условиях более интенсивного отрыва, который захватывает весь межлопаточный канал.

4. Возможность определения природы возбуждения колебаний лопаточных венцов 1-й ступени КВД АГТД при различных режимах его эксплуатации.

В процессе вибродоводки одного из АГТД было обнаружено, что в замковой части лопаток первой ступени КВД систематически возникали трещины. Одной из возможных причин их появления могла быть возникающая на переходных режимах эксплуатации двигателя потеря динамической устойчивости лопаточного венца, обусловленная дозвуковым решеточным флаттером. С целью предотвращения возможных автоколебаний были внесены конструктивные изменения, заключающиеся в закрупке на 5° периферийной части пера лопаток.

Результаты расчета границы динамической устойчивости венца с исходным и после дополнительной закрутки пером лопаток с использованием экспресс-метода представлены на рис. 5.

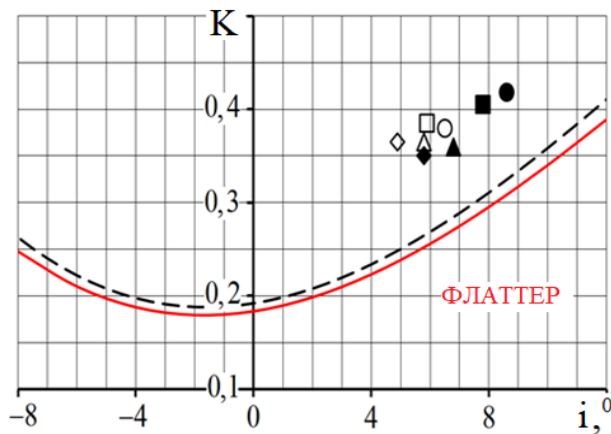


Рис. 5. Зависимость критических значений приведенной частоты колебаний от угла лопаток 1-й ступени КВД АГТД до (сплошная линия и светлые маркеры) и после закрутки (пунктирная и темные маркеры) пера. Маркеры – значения приведенной частоты колебаний для режимов эксплуатации двигателя

Видно, что режимы эксплуатации лопаточного венца находятся в области устойчивости, а увеличение угла выноса в периферийной части лопаток практически не влияет на границу к дозвуковому флаттеру, но приводит к ухудшению эффективности функционирования исследуемой ступени вследствие уменьшения максимальных значений угла атаки в периферийной части лопаток. Поэтому можно сделать вывод, что возникновение трещин в замковой части рабочих лопаток не обусловлено возникновением решеточного флаттера. В дальнейшем было определено, что их образование вызвано вынужденными колебаниями лопаток из-за воздействия следов в поле скоростей, образующихся от впереди стоящих стоек.

Заключение

На основе проведенных исследований по применению экспресс-метода для прогнозирования динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру лопаточных венцов отдельных ступеней компрессоров некоторых типов АГТД и сравнения их результатов с данными стендовых испытаний и полученных с использованием других методов (собственных значений и энергетического), установлено, что разработанный метод позволяет с высокой степенью достоверности устанавливать границу флаттера, а также осуществлять оптималь-

ный выбор значений приведенной частоты колебаний лопаток для заданного диапазона изменения угла атаки периферийных сечений лопаточных венцов по условию его возникновения.

Работа выполнена в рамках рабочих планов бюджетной темы 1.3.4.1707 «Определение закономерностей влияния на вибрационные характеристики неконсервативных механических систем начальных конструктивно-технологических дефектов и локальных эксплуатационных повреждений с учетом действия внешних факторов разной природы» (№ ДР 0117U002231).

Литература

1. 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. Зинковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 5(40). – С. 71-75.
2. 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. Зинковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 8 (115). – С. 131-137.
3. Stel'makh, A. L. Effect of the geometrical parameters of a compressor cascade on the limit of bending self-oscillations of blades caused by cascade flutter [Text] / A. L. Stel'makh, A. A. Kaminer // *Strength of Materials*. – 1983. – № 1. – P. 104-109.
4. Stel'makh, A. L. Experimental-numerical investigation of the dynamic stability of flexural-torsional vibrations of compressor blades under conditions of attached and separated flow. part 3. mutual aerodynamic couplings [Text] / A. L. Stel'makh, A. P. Zinkovskii, Ya. A. Stel'makh // *Strength of Materials*. – 2010. – № 3. – P. 304-312.
5. Kabannik, S. N. Determination of the subsonic flutter stability boundary of blade rows at large angles of attack [Text] / S. N. Kabannik, A. P. Zinkovskii, A. L. Stel'makh // *Strength of Materials*. – 2018. – № 2. – P. 254-263.
6. Stel'makh, A. L. Rapid method of predicting the subsonic flutter stability of agte axial-flow compressor blade cascades. Part 1. Physical backgrounds of the method [Text] / A. L. Stel'makh, A. P. Zinkovskii, S. N. Kabannik // *Strength of Materials*. – 2019. – № 2. – P. 175-182.
7. Кабанник, С. Н. Реализация метода экспресс-оценки устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру для изгибаемой формы колебаний лопаточных венцов осевых компрессоров ГТД [Текст] / С. Н. Кабанник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 7 (124). – С. 90-93.

8. Tsymbalyuk, V. A. *Experimental-Calculation Determination of Dynamic Stability of Blade Assemblies of GTE Compressor Rotor Wheels [Text]* / V. A. Tsymbalyuk, A. P. Zinkovskii, A. V. Poberezhnikov // *Strength of Materials*. – 2001. – № 6. – P. 516-525.

9. Оцінка динамічної стійкості лопаточних венців робочих колес компресора ГТД [Текст] / В. І. Колесников, В. А. Цимбалюк, А. П. Стельмах і др. // Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій: Тр. Між нар. конф. 6-9 червня 2000 р., Київ. – 2000. – Т. 2. – С. 801-806.

References

1. Stelmakh, A. L., Stelmakh, Ya. A., Zinkovskiy A. P. Metodika ekspress – otsenki dinamicheskoy ustoichivosti kompressornykh lopatok gazoturbinnogo dvigatelya k dozvukovomu reshetochnomu flatteru [The methods of rapid assessment of the dynamic stability of compressor blades of a gas turbine engine against subsonic flutter]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2003, no 5 (40), pp. 71-75.

2. Kabannik, S. N. Stelmakh, A. L., Zinkovskiy, A. P. Algoritm realizatsii metoda ekspress-otsenki ustoichivosti k dozvukovomu reshetochnomu flatteru lopatochnykh ventsov kompressorov [Algorithm for implementing the express-evaluation method to predict the stability of compressor blading against subsonic flutter]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2014, no 8 (115), pp. 131-137.

3. Stel'makh, A. L., Kaminer, A. A. Effect of the geometrical parameters of a compressor cascade on the limit of bending self-oscillations of blades caused by cascade flutter. *Strength of Materials*, 1983, no. 1, pp. 104-109.

4. Stel'makh, A. L., Zinkovskii, A. P., Stel'makh, Ya. A. Experimental-numerical investigation of the dynamic stability of flexural-torsional vibrations of compressor blades under conditions of attached and separated flow. part 3. mutual aerodynamic couplings. *Strength of Materials*, 2010, no. 3, pp. 304-312.

5. Kabannik, S. N., Zinkovskii, A. P., Stel'makh, A. L. Determination of the subsonic flutter stability boundary of blade rows at large angles of attack. *Strength of Materials*, 2018, no. 2, pp. 254-263.

6. Stel'makh, A. L., Zinkovskii, A. P., Kabannik, S. N. Rapid method of predicting the subsonic flutter stability of agte axial-flow compressor blade cascades. Part 1. Physical backgrounds of the method. *Strength of Materials*, 2019, no. 2, pp. 175-182.

7. Kabannik, S. N. Realizatsiya metoda ekspress – otsenki ustoichivosti k dozvukovomu reshetochnomu flatteru dlya izgibnoy formy kolebaniy lopatochnykh ventsov osevykh kompressorov GTD [Implementation of the express method for evaluation of stability of flexural mode of GTE axial compressor blading against subsonic flutter]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 7 (124), pp. 90-93.

8. Tsymbalyuk, V. A., Zinkovskii, A. P., Poberezhnikov, A. V. Experimental-Calculation Determination of Dynamic Stability of Blade Assemblies of GTE Compressor Rotor Wheels. *Strength of Materials*, 2001, no. 6, pp. 516-525.

9. Kolesnykov, V. Y., Tsymbaliuk, V. A., Stelmakh, A. L., Zynkovskiy, A. P., Poberezhnykov, A. V. Otsenka dynamicheskoi ustoichyvosti lopatochnykh ventsov rabochykh kolos kompressora HTD [Estimation of dynamic stability of blade assemblies of GTE compressor rotor wheels]. *Otsinka y obgruntuvannya prodovzhennia resursu elementiv konstruktsii: Tr. Mizh nar. konf. 6-9 chervnia 2000 r., Kyiv* [in Proc. Life Assessment and Management for Structural Components]. 2000, no. 2, pp. 801-806.

Поступила в редакцию 12.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ДО ДОЗВУКОВОГО ФЛАТЕРУ ЛОПАТКОВИХ ВІНЦІВ КОМПРЕСОРІВ ДЕЯКИХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

А. П. Зінковський, А. Л. Стельмах, С. М. Кабанник

В роботі представлені результати досліджень по верифікації експрес-методу прогнозування динамічної стійкості до дозвукового решіткового флатеру на прикладі лопаткових вінців окремих ступенів компресора деяких типів авіаційних газотурбінних двигунів при різних режимах їх експлуатації. Наведено короткий зміст основних положень розробленого експрес – методу, можливості програми визначення границі стійкості лопаткових вінців до дозвукового решіткового флатеру, а також результати оцінки динамічної стійкості компресорних ступенів ряду сучасних авіаційних газотурбінних двигунів. На основі отриманих даних досліджень встановлено наступне. По-перше, приведені частоти коливань досліджуваних лопаткових вінців і критичні їх значення визначені на основі даних випробувань прямих решіток лопаткових профілів, відповідним двом периферійним перерізам по висоті пера лопаток, практично співпадають, що означає можливість вирішення задачі, використовуючи тільки газодинамічні параметри потоку для одного з периферійних перерізів пера в заданому діапазоні його висоти. По-друге, на прикладі прогнозування динамічної стійкості до дозвукового решіткового флатеру лопаткових вінців окремих ступенів компресорів деяких типів авіаційних газотурбінних двигунів і порівняння отриманих результатів з даними стендових випробувань та отри-

маних з використанням інших методів (власних значень і енергетичного), показано, що розроблений метод дозволяє з високим рівнем достовірності встановлювати границю флатеру, а також здійснювати оптимальний вибір значень приведеної частоти коливань лопаток для заданого робочого діапазону кута атаки периферійних перерізів лопаткових вінців по умові його виникнення. По-третє, на прикладі аналізу виникнення тріщини в замковій частині робочих лопаток першої ступені компресора високого тиску двигуна одного з авіаційних газотурбінних двигунів розглянута можливість визначення природи збудження коливань для лопаткових вінців, а також дана оцінка проведених заходів при їх усуненні. Крім цього, показано, що при великих кутах атаки ($\geq 10^\circ$) може відбуватись значне зміщення границі динамічної стійкості лопаткових вінців в бік більших значень приведеної частоти їх коливань.

Ключові слова: лопатковий вінець; профіль; осьовий компресор; авіаційний газотурбінний двигун; дозвуковий решітковий флатер; границя динамічної стійкості; кут атаки; приведена частота коливань.

ASSESSMENT RESULTS OF THE DYNAMIC STABILITY FOR SUBSONIC FLUTTER OF THE BLADE ASSEMBLIES OF THE COMPRESSORS OF SOME AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINES

A. P. Zinkovskii, A. L. Stel'makh, S. M. Kabannyk

The paper outlines the results of the investigation on the verification of the express method of prediction of dynamic stability for subsonic flutter using the blade assemblies of individual stages of the compressor of some types of aircraft gas-turbine engines at different modes of their operation. The paper gives a brief overview of the basic concepts of the developed express estimation method, possibilities of the determination of the stability limit for the blade assemblies for a subsonic flutter, as well as the results of the assessment of the dynamic stability of the compressor stages of some modern aircraft gas-turbine engines. Firstly, the reduced frequencies of vibrations of the blade assemblies under investigation and their critical values coincide practically. The mentioned critical values were determined from the test data for the straight cascades of the blade airfoils corresponding to two sections of the height of the blade airfoil portion. Hence it follows that the task can be solved employing only gas-dynamic parameters of the flow for one of the sections of the airfoil within the specified range of its height. Secondly, the prediction of dynamic stability for the subsonic flutter of the blade assemblies of separate compressor stages of some types of aircraft gas-turbine engines and the comparison of the obtained results with the data of bench tests, as well as the data obtained using other methods, were made. It was implied that the developed method allows one to determine the flutter limit with high accuracy, as well as make an optimal selection of the values of the reduced frequency of the blade vibrations for the specified range of the angle of attack of the sections of the blade assemblies upon the condition of its occurrence. Thirdly, the possibility to determine the nature of vibration excitation for the blade assemblies is considered using the analysis of the initiation of cracks in the blade root of the first compressor stage of the high-pressure gas-turbine engine. Moreover, it is shown that at large angles of attack ($\geq 10^\circ$) an insignificant displacement of the dynamic stability limit of the blade assemblies may occur in the direction of large values of the reduced frequency of their vibrations.

Keywords: blade assembly; airfoil; axial compressor; aircraft gas-turbine engine; subsonic flutter; dynamic stability limit; angle of attack; reduced frequency of vibrations.

Зиньковский Анатолий Павлович – д-р техн. наук, проф., заместитель директора по научной работе, заведующий отделом колебаний и вибрационной надежности, Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина.

Стельмах Анатолий Леонидович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина.

Кабанник Сергей Николаевич – канд. техн. наук, науч. сотр., Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина.

Zinkovskii Anatolii Pavlovych – Doctor of Technical Science, prof., Deputy Director in Science, Head of the department of oscillations and vibration reliability, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua,

ORCID Author ID: 0000-0003-0803-7054, Scopus Author ID: 14066898800,

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=ySaBMRQAAAAJ&hl=uk>.

Stelmakh Anatolii Leonidovych – Candidate of Technical Science, senior researcher, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: stelmakh@ipp.kiev.ua,

ORCID Author ID: 0000-0001-6762-4238, Scopus Author ID: 6602367593,

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=eJVkFJ0AAAAJ&hl=uk>.

Kabannyk Serhii Mykolaiovych – Candidate of Technical Science, researcher, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: kabannyk@ukr.net,

ORCID Author ID: 0000-0002-6315-1987, Scopus Author ID: 57202132991,

https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=_txjF_4AAAAJ.