УДК 621.515/62-752

Экспериментально-расчетное исследование динамической устойчивости изгибно-крутильных колебаний компрессорных лопаток при безотрывном и срывном обтекании. Сообщение 3. Взаимные аэродинамические связи

А. Л. Стельмах[а], А. П. Зиньковский[а], Я. А. Стельмах[б]

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

[б] Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Рассматриваются результаты исследования взаимных аэродинамических связей, обусловливающих нестационарные аэродинамические взаимодействия между поступательными и угловыми составляющими перемещений соседних лопаток венца, при изменении угла атаки, приведенной частоты колебаний и геометрических параметров решетки. Оценено влияние взаимных аэродинамических связей соседних лопаток на аэродинамическую устойчивость изгибно-крутильных колебаний лопаток периферийного сечения бандажированного вентиляторного венца газотурбинного двигателя для угла атаки 15°.

Ключевые слова: компрессорная лопатка, профиль, изгибно-крутильные колебания, флаттер, взаимные аэродинамические связи, аэродинамическая устойчивость.

Введение. Ранее [1] изложены результаты определения перекрестных аэродинамических характеристик (ПАХ) и их влияние на устойчивость к флаттеру компрессорных и вентиляторных лопаток. Эти характеристики при изгибно-крутильных колебаниях лопаток обусловлены аэродинамическим взаимодействием между поступательными и угловыми перемещениями их сечений. Однако при работе осевых турбомашин возникают также взаимные аэродинамические связи вследствие взаимодействия в потоке составляющих перемещений соседних лопаток венца. Они, как отмечается в [2], могут быть причиной появления решеточного флаттера лопаток как в условиях их безотрывного, так и срывного обтекания. При этом анализ научно-технической литературы показывает, что характер изменения этого вида связей в зависимости от условий обтекания и параметров колебания лопаток, а также их влияние на аэродинамическую устойчивость венцов практически не изучены. Поэтому цель настоящей работы состоит в определении закономерностей изменения взаимных аэродинамических связей в зависимости от угла атаки и приведенной частоты колебаний для различных геометрических характеристик (относительный шаг и угол выноса) венца и их влияния на его аэродинамическую устойчивость.

Особенности экспериментального определения взаимных аэродинамических связей лопаток. Взаимные аэродинамические связи между лопатками определялись на основе использования плоских решеток профилей (рис. 1) при их испытаниях на экспериментальном стенде [3]. На исходном лопаточном профиле ($n = 0$), колеблющемся с заданными амплитудами посту-

© А. Л. СТЕЛЬМАХ, А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ, Я. А. СТЕЛЬМАХ, 2010

пательных y и угловых α перемещений и углом сдвига фазы между ними $\theta_{y\alpha}$, измерялись компоненты нестационарных аэродинамических сил L и моментов M при последовательном возбуждении колебаний профилей, расположенных выше ($n=-1$) и ниже ($n=+1$) по потоку. Результаты измерений представлены в виде векторов $\overline{L}_{ny}$, $\overline{L}_{n\alpha}$, $\overline{M}_{ny}$, $\overline{M}_{n\alpha}$ ($n=\pm 1$), которые обусловливают взаимную нестационарную аэродинамическую связь между исходным и соседними к нему профилями. Если векторы сил $\overline{L}_{ny}$ и моментов $\overline{M}_{n\alpha}$ определяются соответственно только при поступательных и угловых перемещениях, то векторы сил $\overline{L}_{n\alpha}$ – при поступательных перемещениях исходного и угловых перемещениях соседних профилей, моментов $\overline{M}_{ny}$ – наоборот, при угловых перемещениях исходного и поступательных перемещениях соседних профилей.

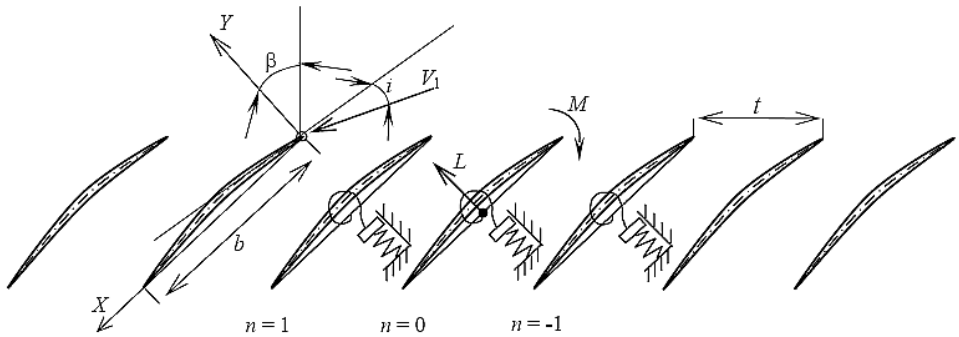
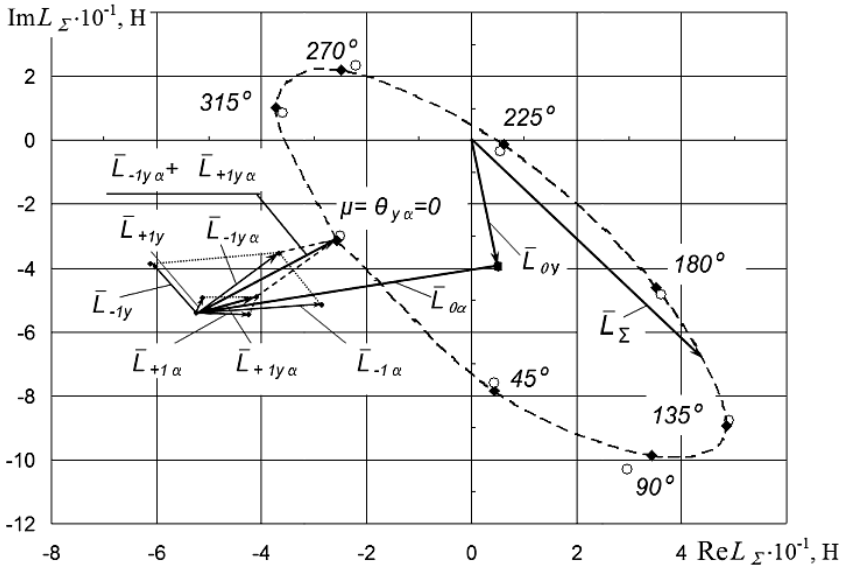
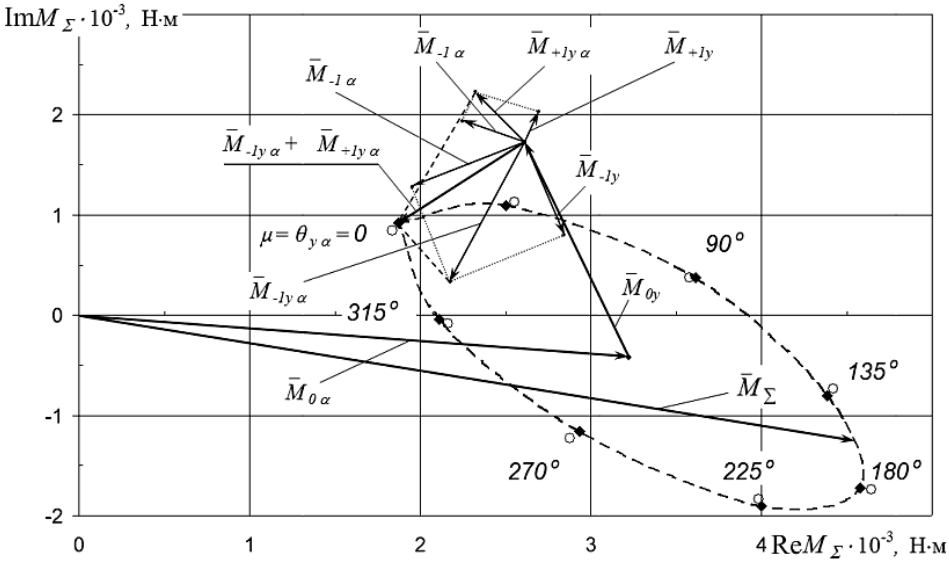


Рис. 1. Модель прямой решетки лопаточных профилей.

Экспериментальное изучение взаимных аэродинамических связей осуществлялось в тех же диапазонах изменения параметров решетки лопаточных профилей, условий их обтекания и характеристик колебаний, что и ранее [1], с использованием методических подходов и средств, представленных в работе [3]. При этом положение центра кручения в процессе испытаний не изменялось, он находился на середине хорды профилей. Для определения возможности использования в выбранном диапазоне значений исследуемых параметров принципа суммирования компонент нестационарных аэродинамических нагрузок, обусловливающих взаимные связи лопаток, правомерность которого была подтверждена при изучении ПАХ [1], были проведены испытания решеток. При этом варьировались углы μ сдвига фаз как соседних профилей, так и $\theta_{y\alpha}$ их поступательных и угловых перемещений, а также соотношения амплитуд этих перемещений при различных углах атаки и приведенных частотах колебаний. По данным выполненных испытаний определялись нестационарные аэродинамические нагрузки, действующие на исходный лопаточный профиль, двумя методами: по принципу суммирования компонент нестационарных аэродинамических нагрузок со стороны соседних профилей ($n=\pm 1$) и непосредственным измерением при синхронных колебаниях трех указанных профилей. Примеры результатов исследований для решетки с углом выноса $\beta=45°$ и относительным шагом $\bar{t}=1{,}0$ при угле атаки $i=10°$ и приведенной частоте колебаний $K=0{,}5$ представлены на рис. 2 и 3. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.



а



б

Рис. 2. Значения (◆, ○) и векторные диаграммы нестационарных аэродинамических сил (*а*) и моментов (*б*), действующих на лопаточный профиль решетки с параметрами $\beta = 45°$, $\bar{t} = 1{,}0$ при угле атаки $i = 10°$ и приведенной частоте колебаний $K = 0{,}5$, определенные по принципу суммирования (◆) и непосредственным измерением (○) при одновременном изменении углов сдвига фаз μ и $\theta_{y\alpha}$.

1. Данные определения нестационарных аэродинамических нагрузок выбранными методами (рис. 2) практически совпадают, что свидетельствует о правомерности использования принципа суммирования при решении задачи аэродинамической устойчивости в заданном диапазоне значений параметров решетки профилей, условий их обтекания и приведенных частот колебаний.

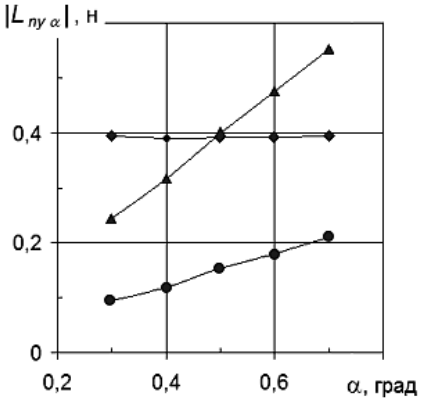


Рис. 3. Зависимость амплитуды составляющих нестационарных аэродинамических нагрузок $0y$ (◆), -1α (▲) и $+1\alpha$ (●), действующих на исходный профиль, от амплитуды угловых перемещений α соседних профилей при $y = 0{,}25$ мм.

2. Зависимость амплитуд составляющих нестационарных аэродинамических нагрузок, действующих на исходный профиль, от амплитуд поступательных и угловых перемещений соседних профилей имеет линейный характер (рис. 3) в выбранном диапазоне значений исследуемых параметров.

Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на правомерность принятого методического подхода при экспериментальном определении различных компонент нестационарных нагрузок, действующих на исходный вибрирующий профиль в условиях его связности с соседними профилями решетки в заданном диапазоне варьируемых параметров.

Результаты исследований взаимных аэродинамических связей решетки лопаточных профилей. Как и в случае перекрестных аэродинамических характеристик лопаточного профиля [1], рассмотрим влияние параметров колебаний профилей, условий их обтекания и геометрии решетки на взаимные аэродинамические связи. На основании данных испытаний решеток с разным относительным шагом $\bar{t}$ и углом выноса β установлены закономерности влияния приведенной частоты колебаний K и угла атаки i, определяющего условия обтекания профилей, на нестационарные аэродинамические нагрузки, действующие со стороны соседних профилей ($n = \pm 1$), которые характеризуют взаимные аэродинамические связи, на исходный ($n = 0$). Составляющие этих нагрузок обозначим нижним индексом, состоящим из сочетания номера профиля ($n = \pm 1$) и вида его перемещений (y или α).

В качестве примера на рис. 4 для решетки с геометрическими параметрами $\bar{t} = 1{,}0$ и $\beta = 30°$ приведены зависимости амплитуд нестационарных аэродинамических нагрузок от приведенной частоты колебаний для углов атаки $i = 0$ и 15°. Там же для сравнения показаны зависимости модуля отрицательных значений мнимой части собственных аэродинамических силы L_{0y} и момента $M_{0\alpha}$ исходного профиля как характеристик аэродемпфирования его колебаний.

Видно, что при безотрывном обтекании ($i = 0$) амплитуды нестационарных аэродинамических нагрузок, характеризующих взаимные аэродинамические связи, ниже модуля собственных аэродемпфирующих силы $-\operatorname{Im} L_{0y}$

и момента $-\operatorname{Im} M_{0\alpha}$ исходного профиля во всем выбранном диапазоне значений приведенной частоты колебаний. Однако при срывном обтекании решетки ($i = 15°$) уменьшение приведенной частоты колебаний вызывает более интенсивный рост амплитуд силовых нагрузок, действующих со стороны соседних профилей на исходный, в результате чего они превышают модуль его аэродемпфирующих силы и момента. Это свидетельствует о возможности возбуждения колебаний лопаток вследствие их взаимных аэродинамических связей. Следует отметить, что для нестационарных аэродинамических моментов это явление наблюдается уже при углах атаки $i = 10°$.

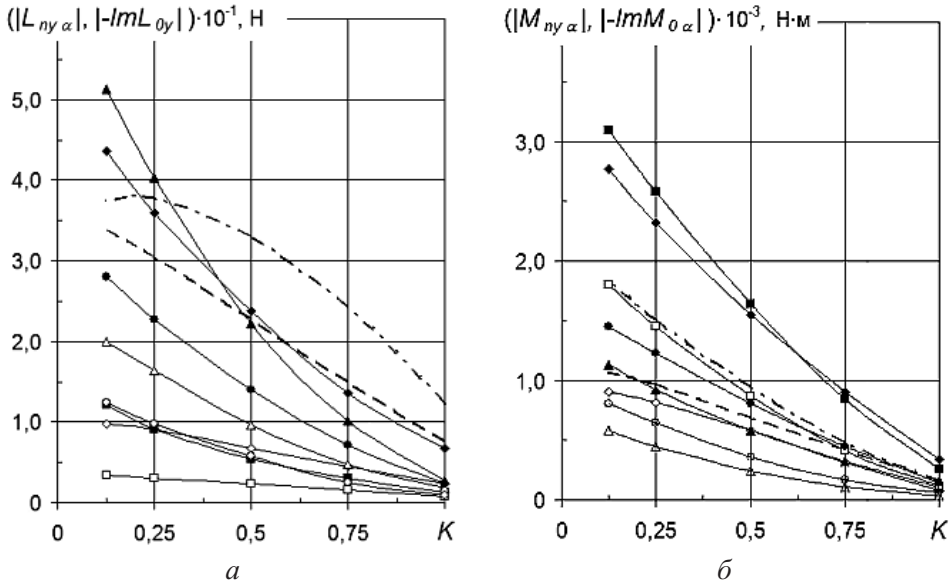


Рис. 4. Зависимость амплитуд составляющих $-1y$ (◇, ◆), -1α (△, ▲), $+1y$ (□, ■), $+1\alpha$ (○, ●) нестационарных аэродинамических сил (*а*) и моментов (*б*) (сплошные линии), а также модуля мнимой части силы и момента (штриховые и штрихпунктирные линии) от приведенной частоты колебаний для решетки с геометрическими параметрами $\beta = 30°$ и $\bar{t} = 1{,}0$ при углах атаки $i = 0$ (светлые точки и штриховые линии) и 15° (темные точки и штрихпунктирные линии).

Рассмотрим влияние таких геометрических параметров решетки, как угол выноса β и относительный шаг $\bar{t}$, на взаимные аэродинамические связи, что иллюстрируют данные, полученные при приведенной частоте колебаний $K = 0{,}25$ (рис. 5 и 6). Видно, что независимо от геометрии решетки минимальные значения амплитуды указанных сил и моментов имеют место при углах атаки, близких к $-5°$, которые характеризуют режим безциркуляционого обтекания профилей. Их увеличение или уменьшение приводит к однозначному повышению амплитуд нестационарных аэродинамических нагрузок. При этом анализ полученных зависимостей для нестационарных сил показывает, что с увеличением относительного шага $\bar{t}$ амплитуды всех их составляющих понижаются в выбранном диапазоне значений углов атаки (рис. 6,*а*). Однако с увеличением угла выноса β это наблюдается только для отдельных составляющих указанных нагрузок, для других при больших углах атаки имеет место обратное явление (рис. 5,*а*). Характер зависимостей ампли-

туд составляющих нестационарного аэродинамического момента от угла атаки при варьировании геометрическими параметрами решетки более сложный (рис. 5 и 6,*б*). Влияние изменения угла выноса аналогично случаю нестационарных аэродинамических сил (рис. 5), в то время как влияние относительного шага решетки на рассматриваемые амплитуды составляющих нестационарных моментов несколько иное. Указанные зависимости наряду с минимумом при $i \approx -5°$ характеризуются также максимумом при $i \approx 10°$. Если минимальные значения амплитуд уменьшаются с ростом относительного шага, то максимальные значения, наоборот, увеличиваются. Такая закономерность в изменении амплитуд аэродинамических моментов может быть обусловлена тем, что с увеличением относительного шага решетки при постоянном угле выноса повышается интенсивность срывных явлений на лопатках для углов $i \geq 10°$, что способствует зарождению и развитию срывного флаттера в решетке лопаточных профилей.

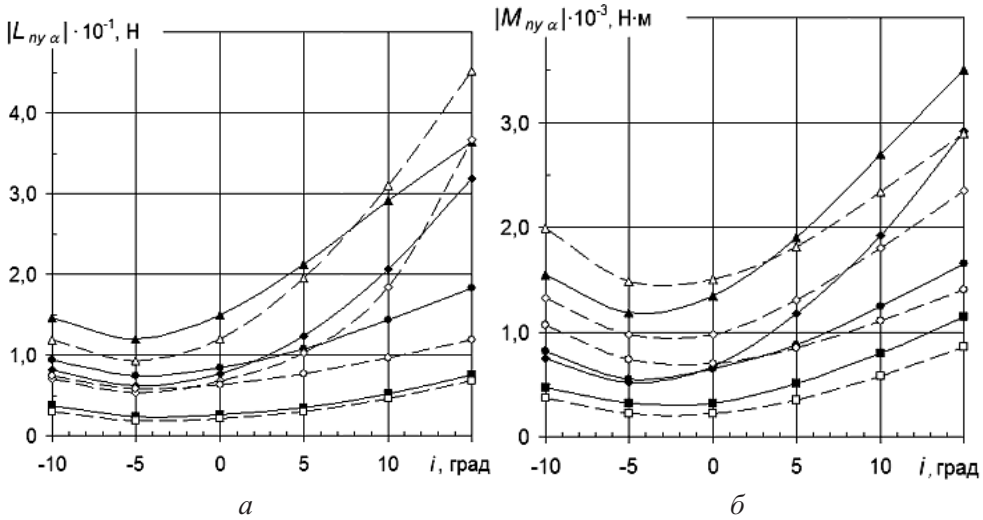


Рис. 5. Зависимость амплитуды составляющих $-1y$ (◇, ◆), $+1y$ (□, ■), -1α (△, ▲), $+1\alpha$ (○, ●) нестационарных аэродинамических сил (*а*) и моментов (*б*) от угла атаки для решеток с относительным шагом $\bar{t} = 1{,}0$ и углом выноса $\beta = 30$ (сплошные линии) и 60° (штриховые линии) при приведенной частоте колебаний $K = 0{,}25$.

Сравнение результатов, представленных на рис. 6,*б*, с данными для перекрестных аэродинамических характеристик (рис. 3,*б* [1]) указывает на сходный характер их изменения в зависимости от угла атаки. Это свидетельствует об идентичности проявления аэродинамического взаимодействия соседних лопаток с их перекрестными аэродинамическими характеристиками.

Представляет интерес анализ влияния параметров решетки, условий ее обтекания и приведенной частоты колебаний на соотношение нестационарных аэродинамических нагрузок, характеризующих взаимные и перекрестные связи профилей. Поэтому были получены зависимости отношений $\Delta L_n = \left|L_{ny\alpha}\right| / \left|L_{0\alpha}\right|$ и $\Delta M_n = \left|M_{ny\alpha}\right| / \left|M_{0y}\right|$ $(n = \pm 1)$ от приведенной частоты колебаний для разных значений геометрических параметров решетки и усло-

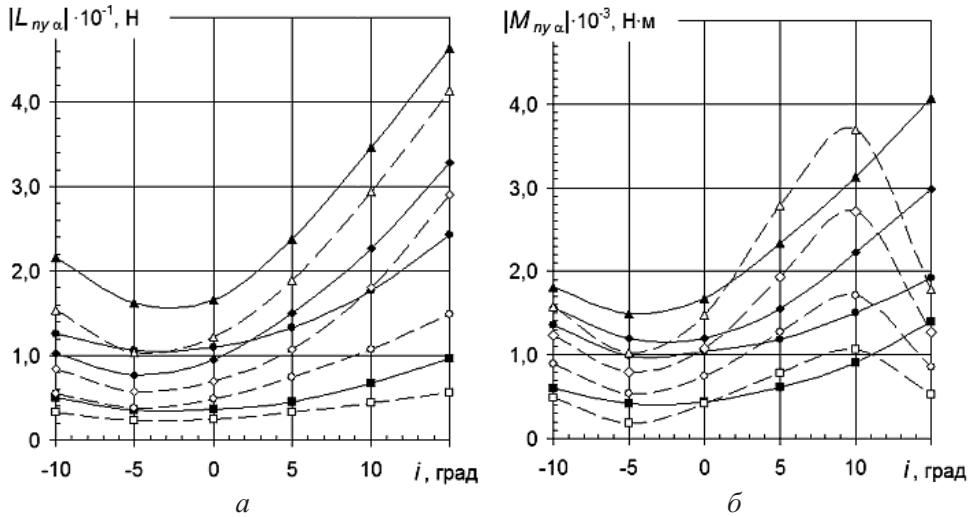


Рис. 6. Зависимость амплитуды составляющих $-1y$ (◇, ◆), $+1y$ (□, ■), -1α (△, ▲), $+1\alpha$ (○, ●) нестационарных аэродинамических сил (*а*) и моментов (*б*) от угла атаки для решеток с углом выноса $\beta = 45°$ и относительным шагом $\bar{t} = 0{,}7$ (сплошные линии) и 1,3 (штриховые линии) при приведенной частоте колебаний $K = 0{,}25$.

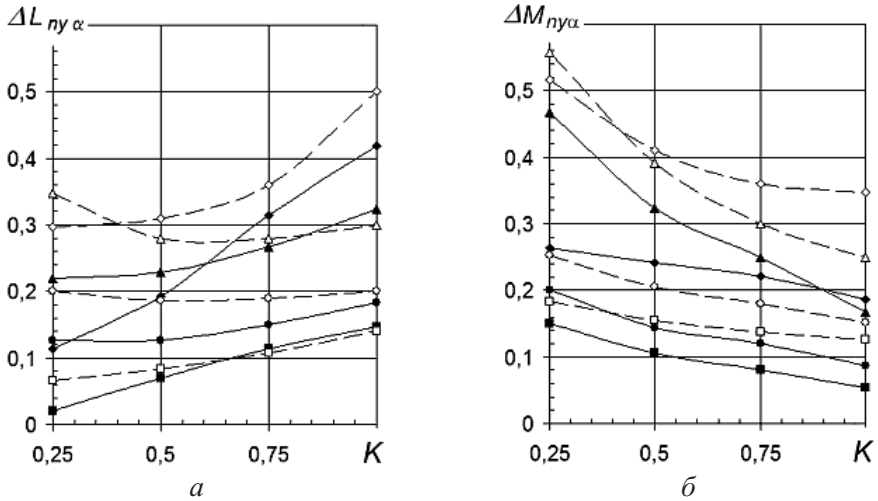


Рис. 7. Зависимость отношения амплитуд составляющих $-1y$ (◇, ◆), $+1y$ (□, ■), -1α (△, ▲), $+1\alpha$ (○, ●) нестационарных аэродинамических нагрузок к соответствующим собственным перекрестным аэродинамическим связям профиля $|L_{0\alpha}|$ (*а*) и $|M_{0\alpha}|$ (*б*) от приведенной частоты колебаний при угле атаки $i = 0$ (темные точки и сплошные линии) и 10° (светлые точки и штриховые линии) для решетки с $\bar{t} = 1{,}0$ и $\beta = 45°$.

вий обтекания (рис. 7). Их анализ показывает, что в выбранном диапазоне угла атаки амплитудные значения перекрестных аэродинамических характеристик профилей выше таковых, описывающих их взаимные связи. При этом с ростом угла атаки наблюдается увеличение отношений Δ. Это может свидетельствовать об усилении влияния взаимных аэродинамических связей лопаток на процесс зарождения решеточного флаттера при углах атаки, близ-

ких к срывному обтеканию. Однако независимо от условий обтекания отношение ΔL_n с повышением приведенной частоты колебаний однозначно уменьшается, а изменение величины ΔM_n имеет более сложный характер, хотя при $K > 0{,}5$ она увеличивается.

Влияние взаимных аэродинамических связей на устойчивость к флаттеру лопаточного венца. Как следует из приведенного анализа взаимных аэродинамических связей лопаток, они, как и их перекрестные аэродинамические характеристики, могут оказывать существенное влияние на устойчивость к флаттеру лопаточного венца, особенно при больших углах атаки. Для подтверждения этого оценим аэродинамическую устойчивость периферийного сечения бандажированного лопаточного венца с $\beta = 62°$ и $\bar{t} = 0{,}78$ вентиляторной ступени современного газотурбинного двигателя.

Для решения задачи, как и при изучении влияния перекрестных аэродинамических характеристик, используем следующие методические подходы.

1. В качестве характеристик аэродинамических нагрузок с учетом представленных выше доказательств принципа суммирования их составляющих принимаем аэродинамические коэффициенты влияния (АКВ), формулы для определения которых в данном случае приобретают такой вид:

$$l_{n\alpha} = \frac{L_{n\alpha}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 b\alpha_n h}; \qquad m_{ny} = \frac{M_{ny}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 b y_n h};$$

$$l_{ny} = \frac{L_{ny}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 b\alpha_n h}; \qquad m_{n\alpha} = \frac{M_{n\alpha}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 b y_n h},$$

где $n = 0, \pm 1$.

2. Устойчивость венца флаттера определяется величиной и знаком коэффициента работы нестационарных аэродинамических нагрузок за цикл колебаний лопаток, который с учетом взаимодействия трех профилей вычисляется по формуле

$$C_A = \sum_{n=-1}^{1} \mathrm{Im}\{[l_{ny}\bar{y}_n^2 + m_{n\alpha}\alpha_n^2 + \bar{y}_n\alpha_n(l_{n\alpha}e^{j\theta_{y\alpha}} + m_{ny}e^{-j\theta_{y\alpha}})]e^{-jn\mu}\},$$

где j – мнимая единица; $\bar{y} = y/b$.

Аэродинамические коэффициенты влияния для расчета коэффициента работы C_A исследуемого лопаточного венца были получены, как и ранее [1], на основании результатов испытаний решеток лопаточных профилей и последующей их интерполяции и экстраполяции с помощью регрессионных полиномов.

Для сопоставления результатов расчета коэффициента работы C_A рассматриваемого периферийного сечения лопаточного венца, полученных по экспериментально определенным аэродинамическим коэффициентам влияния, с данными работы [4] были определены зависимости изменения критических

значений приведенной частоты колебаний K_{cr} от числа узловых диаметров m при $i = 0$ с учетом взаимных аэродинамических связей профилей (рис. 8). Их сравнение показывает хорошее (как количественное, так и качественное) совпадение, что подтверждает возможность использования АКВ, полученных по экспериментальным данным, для оценки аэродинамической устойчивости лопаточных венцов к флаттеру.

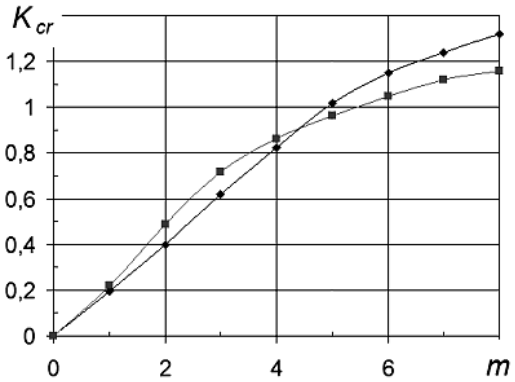


Рис. 8. Зависимость критических значений приведенной частоты колебаний K_{cr} периферийного сечения лопаточного венца от числа узловых диаметров m при $i = 0$, полученная на основании экспериментальных данных (■) и расчетных значений аэродинамических коэффициентов влияния [4] (◆).

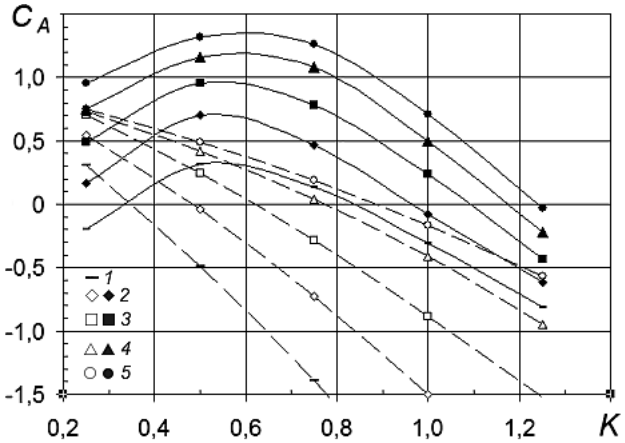


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента работы нестационарных аэродинамических нагрузок C_A периферийного сечения лопаточного венца от приведенной частоты колебаний K при $i = 15°$ и разном числе узловых диаметров m без учета (штриховые линии) и с учетом (сплошные линии) взаимных аэродинамических связей: *1* – $m = 2$; *2* – $m = 3$; *3* – $m = 4$; *4* – $m = 5$; *5* – $m = 6$.

Для определения влияния взаимных аэродинамических связей на устойчивость лопаток к флаттеру выполнены расчеты коэффициента C_A как с учетом указанных связей, так и без учета. Данные для их проведения выбирались исходя из результатов расчета собственных частот и форм колебаний лопаточного венца рассматриваемой вентиляторной ступени. Угол сдвига фаз $\theta_{y\alpha}$ между поступательными и угловыми перемещениями профилей в дан-

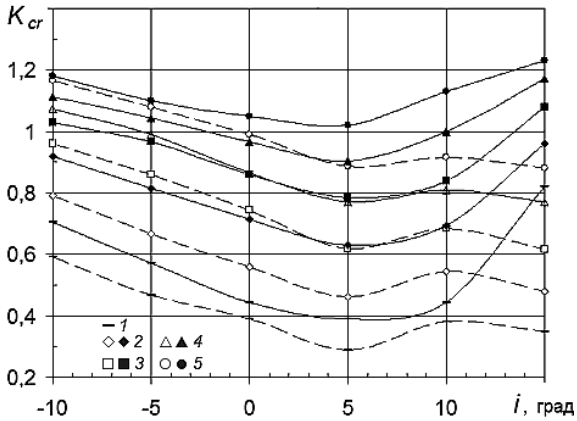


Рис. 10. Зависимость изменения критических значений приведенной частоты колебаний K_{cr} периферийного сечения лопаточного венца от угла атаки при числе узловых диаметров m, равном 2 (*1*), 3 (*2*), 4 (*3*), 5 (*4*), 6 (*5*), полученная без учета (штриховые линии) и с учетом (сплошные линии) взаимных аэродинамических связей.

ном случае выбирался равным 238°, что соответствует вперед бегущей волне деформации, которая, как известно [5, 6], характерна для решеточного флаттера лопаточного венца. Зависимости изменения коэффициента C_A от приведенной частоты для форм колебаний венца с разным числом узловых диаметров при $i = 15°$ представлены на рис. 9. С их использованием были определены зависимости критических значений приведенной частоты колебаний K_{cr} от угла атаки i (рис. 10). Анализ этих зависимостей показывает, что учет взаимной аэродинамической связи лопаток при больших углах атаки ($i > 10°$) может приводить к существенному росту коэффициента работы нестационарных аэродинамических нагрузок C_A и критических значений приведенной частоты колебаний K_{cr}, как определяющей характеристики аэродинамической устойчивости венца, для всех чисел узловых диаметров. Независимо от формы колебаний венца при $i = -10...5°$ наблюдается уменьшение критических значений K_{cr}, при $i > 5°$ – их увеличение, что обусловлено ростом аэродинамического взаимодействия лопаток из-за срыва потока.

Выводы

1. Установлены закономерности влияния геометрических параметров (угол выноса и относительный шаг) решетки, условий ее обтекания и приведенной частоты колебаний на взаимные аэродинамические связи лопаток, совершающих изгибно-крутильные колебания. Показано, что в условиях безотрывного обтекания лопаток основной вклад в процесс формирования флаттера вносят перекрестные аэродинамические характеристики лопаток, тогда как при больших углах атаки преобладает влияние их взаимных аэродинамических связей.

2. Оценена аэродинамическая устойчивость периферийного сечения бандажированного лопаточного венца вентиляторной ступени современного газотурбинного двигателя. Показано, что взаимные аэродинамические связи лопаток могут оказывать существенное влияние на границу их аэродинамической устойчивости.

Резюме

Розглядаються результати дослідження взаємних аеродинамічних зв'язків, що зумовлюють нестаціонарну аеродинамічну взаємодію між поступальними і кутовими складовими переміщень сусідніх лопаток вінця, при зміні кута атаки, приведеної частоти коливань та геометричних параметрів решітки. Оцінено вплив взаємних аеродинамічних зв'язків сусідніх лопаток на аеродинамічну стійкість згинно-крутних коливань лопаток периферійного перетину бандажованого вентиляторного вінця газотурбінного двигуна для кута атаки 15°.

1. *Стельмах А. Л.*, *Зиньковский А. П.*, *Стельмах Я. А.* Экспериментально-расчетное исследование динамической устойчивости изгибно-крутильных колебаний компрессорных лопаток при безотрывном и срывном обтекании. Сообщ. 2. Перекрестные аэродинамические характеристики // Пробл. прочности. – 2009. – № 4. – С. 89 – 100.
2. *Самойлович Г. С.* Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
3. *Стельмах А. Л.*, *Лен А. Д.*, *Зиньковский А. П.* Экспериментально-расчетное исследование динамической устойчивости изгибно-крутильных колебаний компрессорных лопаток при безотрывном и срывном обтекании. Сообщ. 1. Методика и средства определения нестационарных аэродинамических характеристик // Пробл. прочности. – 2007. – № 2. – С. 129 – 142.
4. *Горелов Д. Н.*, *Курзин В. Б.*, *Сарен В. Э.* Атлас нестационарных аэродинамических характеристик решеток профилей. – Новосибирск: Наука, 1974. – 150 с.
5. *Carta F. O.* Coupled blade–disk–shroud flutter instabilities in turbojet engine rotors // J. Eng. Power. – 1967. – **89**, No. 3. – С. 419 – 426.
6. *Сачин В. М.*, *Хориков А. А.*, *Шатохин А. Г.* Исследование фазовых характеристик связанных колебаний лопаток компрессоров в потоке // Тр. ЦИАМ. – 1981. – № 953. – С. 287 – 296.

Поступила 06. 05. 2009