

УДК 621.51-253.5:621.45.026.8

## **К вопросу о постановке задачи расчета колебаний решеток компрессоров для определения аэроупругих характеристик**

Т.В. Буюкли, В.А. Шорстов

### **Аннотация**

Проведены исследования нестационарных возмущений в решетке профилей, полученной сечением цилиндрической поверхностью рабочего колеса модельного вентилятора. Рассмотрено обтекание решетки на запертом режиме и на режиме потери газодинамической устойчивости. Расчеты проведены в решетках с неподвижными и с колеблющимися профилями. Показана необходимость учета взаимного влияния потока и конструкции в задачах аэроупругости. Получены условия возникновения вращающегося срыва в решетке.

### **Ключевые слова**

Нестационарные возмущения; решетка профилей; колебания потока; колебания профилей; вращающийся срыв.

Нестационарные аэродинамические и аэроупругие явления влияют на предельную мощность, надежность, эффективность работы и вес турбомашин. Задачи о нестационарных течениях в турбомашинах и, в частности, в аэродинамических решетках, сами по себе не новы. Однако в последнее время появился значительный интерес к проблемам такого рода. Это вызвано тем, что ряд явлений в компрессорах может быть объяснен только при изучении неустановившихся течений. К таким явлениям относятся: аэродемпфирование, вращающийся срыв, различные виды флаттера, возбуждение колебаний лопаток бегущими следами, помпаж и т.д. [1].

Решение задач обтекания решеток неравномерным нестационарным потоком находит множество технических приложений. Определение нестационарных сил, возбуждающих

колебания лопаток, необходимо при оценке их вибрационной надежности. При постановке соответствующих задач для уменьшения расчетных затрат исследователи вводят существенные упрощения. Например, аэроупругий анализ осуществляется различными методами, по большей части игнорирующими влияние вязкости. При решении задачи флаттера часто считается, что влиянием аэродинамических нагрузок на частоту колебаний лопаток можно пренебречь. Аэроупругий расчет решеток турбомашин и целых рабочих колес производится для одной изолированной лопатки с учетом того, что лопатки колеблются с постоянной между собой разницей фаз.

Открывающиеся в настоящее время перед исследователем технологические возможности по моделированию сложных междисциплинарных процессов в авиационном газотурбинном двигателе практически неограниченны, поэтому задача исследования нестационарных возмущений с помощью комплексного подхода (включающего исследование аэродинамики и прочности) является весьма актуальной.

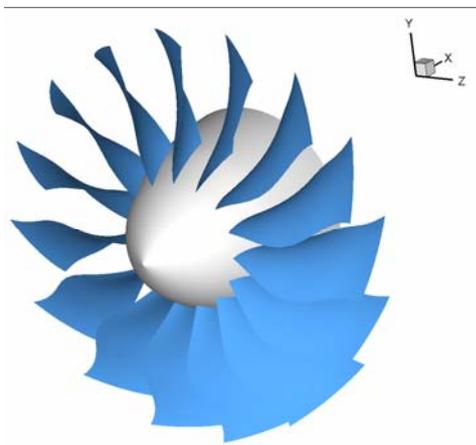


Рис.1. Исследуемое рабочее колесо

### 1. Объект исследования и постановка задачи

В работе проводится исследование структуры нестационарных возмущений в решетке профилей, полученной сечением цилиндрической поверхностью с относительным (отнесенным к

радиусу вентилятора) радиусом  $\bar{R} = 0.95$  рабочего колеса вентилятора.

Исследуемое рабочее колесо модельной ступени С178-1 вентилятора перспективного ТРДД с большой степенью двухконтурности [2] представлено на рис.1.

Для моделирования течения в рабочем колесе использовался разработанный в ЦИАМ программный комплекс COBRA, основанный на неявном модифицированном методе С.К.Годунова. ПК COBRA представляет собой универсальное программное приложение для определения стационарных и нестационарных аэродинамических характеристик элементов силовых установок и летательных аппаратов, позволяющее проводить расчеты при минимальных затратах вычислительных ресурсов (времени и оперативной памяти).

Особенностью постановки задачи являлось, наряду с использованием осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса (URANS), одновременное обтекание всех 15-ти профилей, как без учета их колебаний, так и в случае использования простейшей

механической связи между профилями, учитывающей возможность их перемещения с одновременным поворотом.

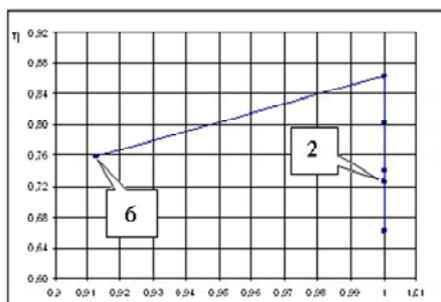
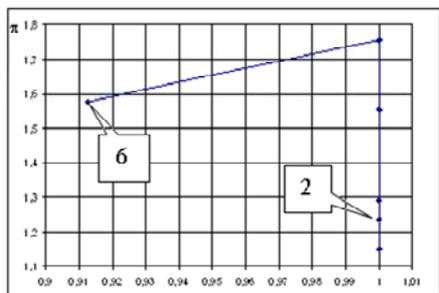


Рис.2. Напорная ветка,  $n_{пр} = 1,05$

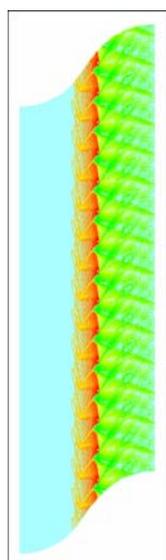
Переход к расчету течения во всей решетке профилей и, соответственно, отказ от расчета одного профиля или группы профилей с условиями периодичности (в том числе, обобщенную периодичность) могут позволить получить новые свойства течения. Замена колеблющихся по заданному закону профилей на простейшие осцилляторы, колеблющиеся под воздействием аэродинамических сил, является физически более обоснованной постановкой задачи расчета течения и позволяет учитывать взаимное влияние свойств течения и механических характеристик профиля.

В расчете использовалась сетка типа «Н», содержащая 71760 ячеек в 15 – ти межлопаточных

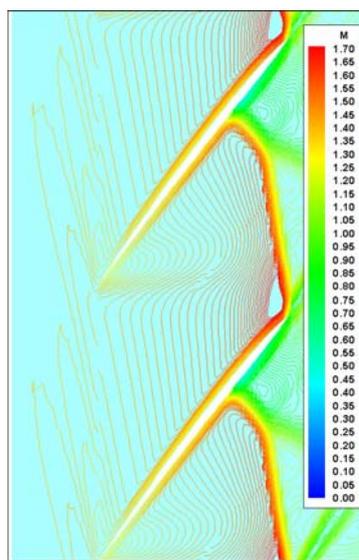
Рис.3 Линии постоянства числа Маха в стационарном течении в решетке профилей на запертом режиме

каналах, модель турбулентности Спаларта-Аллмараса и закон стенки.

Дальнейшие расчеты проводились на основе стационарных течений для точки 2 на рис.2, соответствующей запертому режиму, и точки 6 на рис.2, соответствующей режиму



а) вся решетка



б) два соседних профиля

потери газодинамической устойчивости.

Для иллюстрации характера стационарного течения в рассматриваемой решетке на рис.3 показаны изолинии постоянства числа Маха на запертом режиме, отвечающем точке 2.

Для моделирования механических колебаний профилей решетки с использованием пакетов PATRAN/NASTRAN были рассчитаны собственные частоты и формы колебаний лопатки рабочего колеса вентилятора, показанного на рис.1, находящейся в поле центробежных сил. Результаты расчета первых 5-ти собственных частот представлены в таблице 1.

В последующих расчетах предполагается, что колебания лопатки происходят только по первой (изгибной) форме, показанной на рис.4.

Перемещение центра масс профиля решетки  $\vec{l} = l \cdot \vec{\tau}$  описывается уравнением  $m \cdot \ddot{\vec{l}} + c \cdot \vec{l} = \vec{F}_a$ , где  $m$  – масса профиля на единицу высоты (1 м);  $\vec{F}_a = F_a \cdot \vec{\tau}$  – вектор силы, действующий на профиль;  $\vec{\tau}$  – единичный вектор перемещения;  $c$  – жесткость системы.

Жесткость  $c$  рассматриваемой системы профилей определяется условием равенства ее частоты колебаний собственной частоте всей лопатки по рассматриваемой

$$\text{форме } \sqrt{\frac{c}{m}} = \frac{2\pi}{508.926}$$

Наряду с перемещением центра масс, принималось, что профиль одновременно поворачивается вокруг него на угол  $\alpha$ , определяемый соотношением  $\alpha = \alpha_0 \cdot l$ .

Параметры движения профиля  $\vec{\tau}$ ,  $l$  и  $\alpha_0$  подбирались так, чтобы движение профиля максимально соответствовало перемещению выбранного сечения лопатки по выбранной форме.

## 2. Исследование возмущений в потоке на режиме потери газодинамической устойчивости (точка 6 напорной кривой на рис.2)

*Расчет без учета механических колебаний*

Таблица 1

Собственные частоты и формы колебаний лопатки

№формы	Собств.частота, Гц
1	508,926
2	1071,759
3	1399,410
4	2348,387
5	2613,131

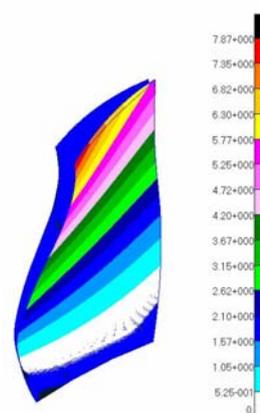


Рис.4. Перемещения рассматриваемой лопатки по первой форме колебаний

Для выяснения структуры возмущений в потоке без учета механических колебаний были выполнены расчеты течения в рассматриваемой решетке с неподвижными профилями в постановке URANS (сетка и модель турбулентности те же, что для стационарных расчетов).

На рис.5 представлена временная зависимость момента аэродинамических сил, действующих на один из профилей. По горизонтальной оси отложено время, деленное на время одного оборота венца.

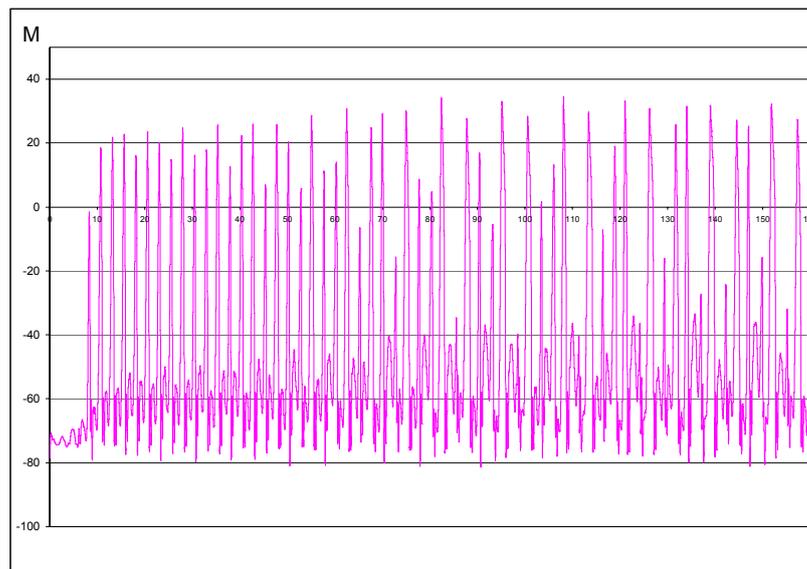


Рис.5. Временная зависимость момента аэродинамических сил (н·м), действующих на 0-ой профиль решетки при отсутствии механических колебаний

На рис.6 показано Фурье-разложение момента аэродинамических сил и Y-ой (вдоль фронта) суммарной силы, действующей на тот же профиль. Здесь  $\delta$  - сдвиг фаз между соседними лопатками,  $N$  – количество профилей в решетке.

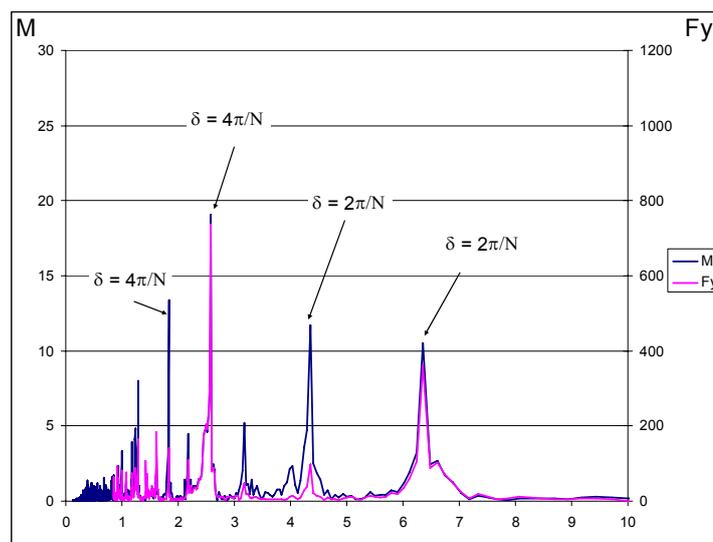


Рис.6. Фурье-разложение момента аэродинамических сил (н·м) и Y-ой (вдоль фронта)

компоненты суммарной силы (н), действующих на 0-ой профиль решетки при отсутствии механических колебаний

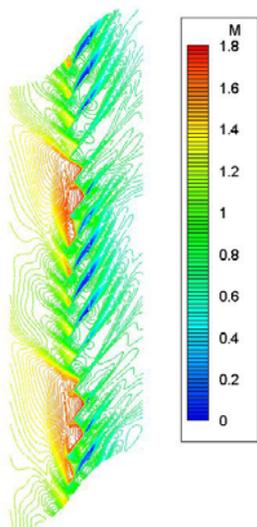


Рис.7. Картина течения в решетке в момент времени 0,0047с

Картина течения в решетке представлена на рис. 7 в виде изолиний постоянства числа Маха. Как видно из рисунка, в решетке образуются 2 зоны срыва, которые двигаются против хода движения решетки. Т.е. поток колеблется в решетке даже в отсутствие колебаний профилей.

#### *Решение совместной задачи*

Задача обтекания решетки свободно колеблющихся профилей в соответствии с описанной в п.1. моделью велась в постановке URANS. Расчеты выполнялись на той же сетке и с той же моделью турбулентности, что стационарные.

Как показали выполненные расчеты, решение совместной (аэроупругой) задачи существенно меняет характер выхода решения на установившийся режим и структуру возмущений в потоке, обтекающем решетку профилей.

Отмеченное обстоятельство иллюстрируется ниже временными зависимостями и Фурье-разложением моментов и сил для разных профилей решетки.

Как видно из рис.8, где представлены временные зависимости момента аэродинамических сил от времени, деленного на время одного оборота венца, при решении совместной задачи наблюдается периодическое движение профилей. Кроме того, соседние профили решетки колеблются с постоянным сдвигом фаз. Исходя из этого, можно сделать вывод о взаимном влиянии конструкции и потока.

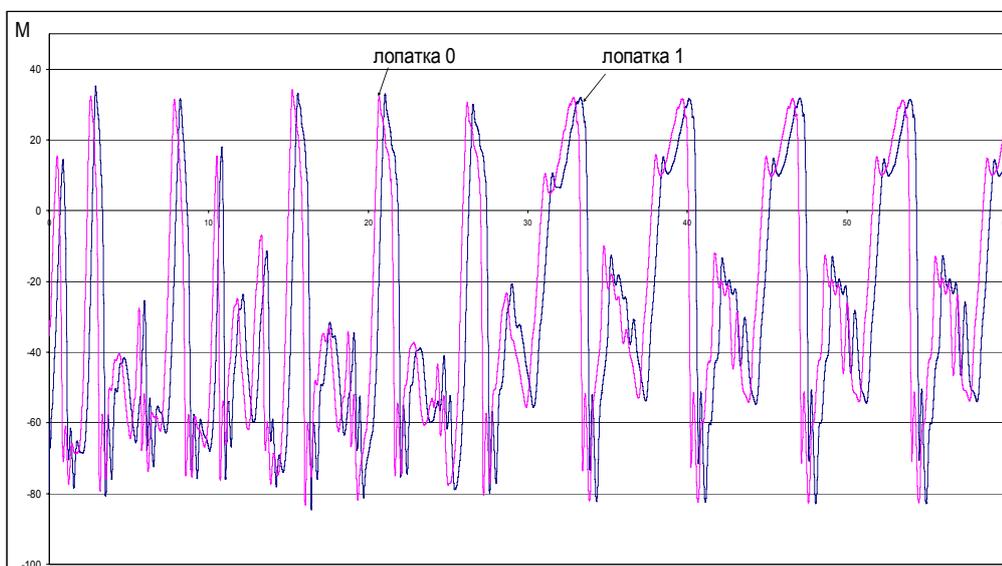


Рис.8. Временные зависимость момента аэродинамических сил (н·м), действующих на 0-й и 1-й профили решетки при решении совместной задачи

Фурье-разложения момента аэродинамических сил и Y – компоненты (вдоль фронта) силы, действующих на 0-ой профиль решетки, представлены на рис.9. Здесь  $\delta$  - сдвиг фаз между соседними лопатками, N – количество профилей в решетке.

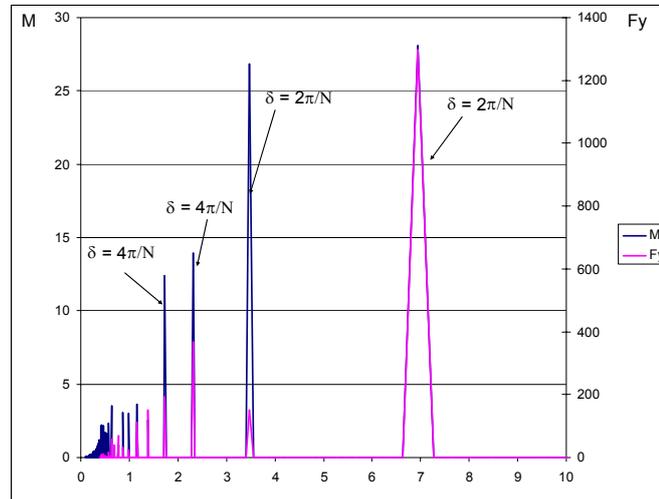
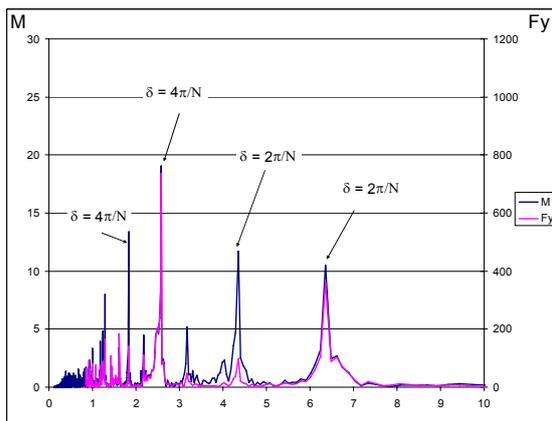
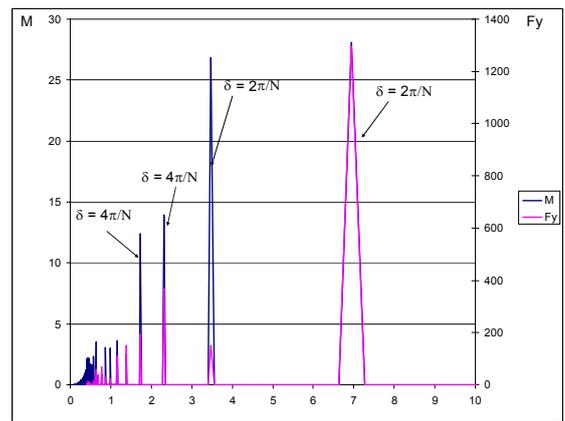


Рис.9. Фурье-разложение момента аэродинамических сил (н·м) и Y-ой (вдоль фронта) компоненты суммарной силы (н), действующих на 0-ой профиль решетки при решении совместной задачи

На рис.10 для наглядности сопоставляются Фурье-разложения, полученные при решении нестационарной задачи при неподвижных профилях (рис.10а) и при решении совместной задачи (рис.10б). Здесь  $\delta$  - сдвиг фаз между соседними лопатками, N – количество профилей в решетке.



а) неподвижные профили (аэродинамическая задача)



б) свободно колеблющиеся профили (совместная задача)

Рис.10. Фурье-разложение момента аэродинамических сил (н·м) и Y-ой (вдоль фронта)

компоненты суммарной силы ( $n$ ), действующих на 0-ой профиль решетки для задач разного типа (аэродинамической и совместной)

Как видно из представленных разложений, в совместной задаче амплитудно-частотные характеристики момента и Y-ой компоненты силы изменились таким образом, что максимальный период колебаний указанных параметров стал кратен (7) периоду собственных колебаний лопатки. Частоты остальных гармоник оказываются кратными этой минимальной частоте (7/2, 7/3, 7/4 и т.д.), а амплитуды гармоник 7/1 и 7/2 возросли по сравнению с их аналогами примерно в 2 раза. Появление кратных собственной частоте гармоник с большой амплитудой может привести к изменению аэроупругих характеристик профиля.

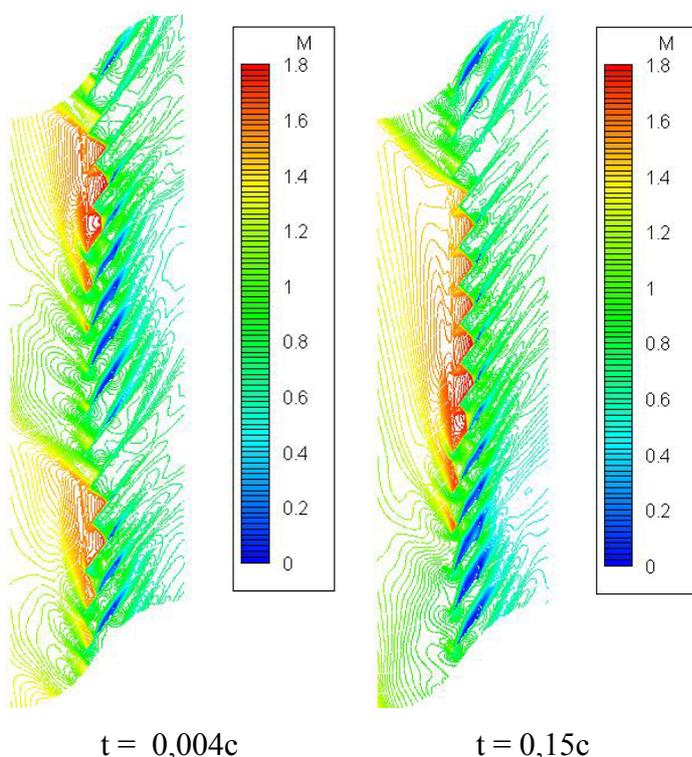


Рис.11. Картина течения в решетке

Картины течения в решетке колеблющихся профилей представлены на рис.11 в виде изолиний постоянства числа Маха. Как видно из рисунка, две зоны срыва, образованные течением в неподвижной решетке (момент времени  $t = 0.004c$ ), при учете колебаний профилей постепенно превращаются в одну большую зону срыва (момент времени  $t = 0.15c$ ). Это подтверждает известную гипотезу об изменении числа зон срыва с последующим переходом к однозональному полному срыву при срывном обтекании решетки [3].

Следует отметить также, что при решении совместной задачи найдены режимы течения, при которых профили образуют группы, колеблющиеся с фиксированным (между группами) сдвигом фаз, чего не наблюдается при решении чисто аэродинамической задачи.

### 3. Решение совместной задачи на запертом режиме (точка 2 напорной кривой на рис.2)

Ниже представлены результаты решения совместной задачи для решетки свободно колеблющихся профилей. Расчеты нестационарного течения в постановке URANS

выполнялись на той же сетке и с той же моделью турбулентности, что стационарные. Выбор шага интегрирования по времени  $\Delta t$  осуществлялся с учетом периодов колебаний (частот), подлежащих анализу. В данном случае был выбран  $\Delta t = 10^{-2} T_1$ , где  $T_1$  – период собственных колебаний по 1-ой форме.

Временные зависимости момента аэродинамических сил, действующего на профили решетки для 100 первых периодов собственных колебаний, представлены на рис.12.

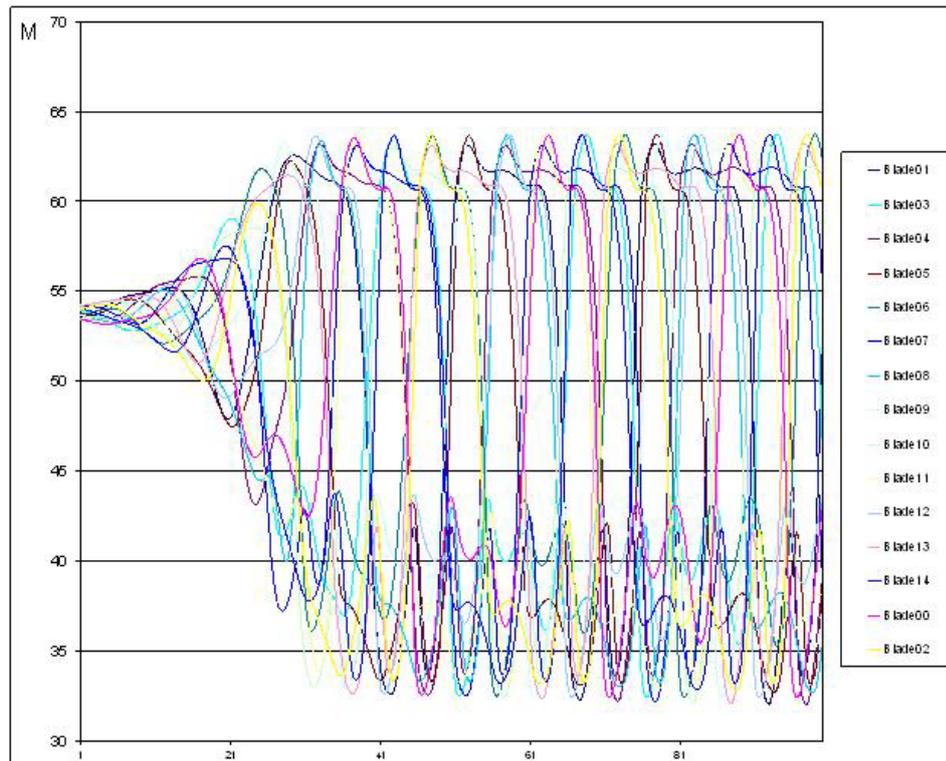
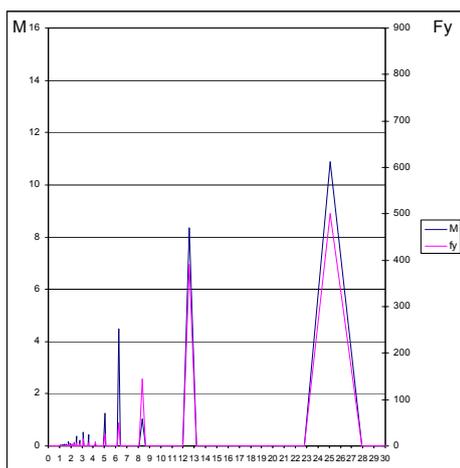


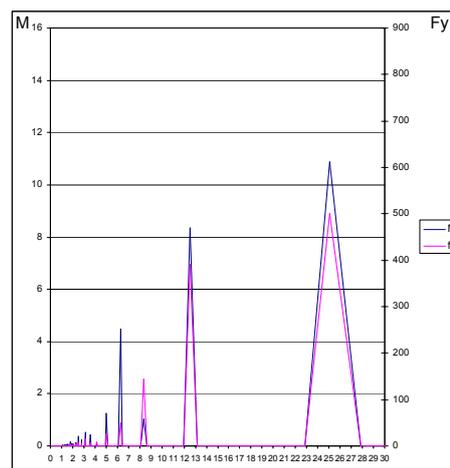
Рис.12. Временные зависимости момента аэродинамических сил (н·м), действующего на профили решетки для 100 первых периодов собственных колебаний на запертом режиме

Из представленных зависимостей видно, что профили в решетке колеблются пятью группами по три лопатки (т.е. нулевая, третья, шестая, девятая, двенадцатая колеблются одинаково с постоянным сдвигом фаз).

Отмеченное выше обстоятельство подтверждается представленным на рис.13 разложением в ряд Фурье полученных временных зависимостей момента аэродинамических сил и Y-вой составляющей силы (вдоль фронта), действующих на профили решетки. Из представленных разложений видно, что они идентичны для каждого четвертого профиля.



0-ой профиль



3-й профиль

Рис.13. Результаты разложения в ряд Фурье аэродинамического момента (н·м) и  $Y$  – составляющей силы (н), действующих на разные профили решетки на запертом режиме

Это означает, что аэроупругий анализ изолированного профиля с условием обобщенной периодичности, не позволит получить верные результаты. Расчеты аэроупругих характеристик решетки необходимо проводить с учетом всех профилей.

#### Заключение и выводы

С использованием разработанного метода проведены исследования структуры нестационарных возмущений в решетке профилей, полученной сечением рабочего колеса модельной ступени вентилятора перспективного ТРДД.

1. На режиме потери газодинамической устойчивости выполнен расчетный анализ нестационарного течения в периферийном сечении рабочего колеса без учета колебаний и с учетом свободных колебаний профилей по 1-ой форме (совместная задача). Выявлено взаимное влияние потока и конструкции. Получены условия возникновения вращающегося срыва в решетке. При решении совместной задачи получено подтверждение гипотезы о перестроении течения при вращающемся срыве и объединении срывных зон в одну.

2. В совместной задаче амплитудно-частотные характеристики момента и компоненты силы изменились таким образом, что максимальный период колебаний указанных параметров стал кратен (7) периоду собственных колебаний лопатки. Частоты остальных гармоник оказываются кратными этой минимальной частоте ( $7/2$ ,  $7/3$ ,  $7/4$  и т.д.), а амплитуды гармоник  $7/1$  и  $7/2$  возросли по сравнению с их аналогами примерно в 2 раза. Появление кратных собственной частоте гармоник с большой амплитудой может привести к изменению аэроупругих характеристик профиля. Таким образом, при расчете

аэроупругих явлений в решетках компрессоров, необходимо учитывать взаимное влияние колебаний потока и конструкции.

3. На запертом режиме проведен расчет совместной задачи обтекания колеблющихся профилей. Выявлено, что профили образуют группы, колеблющиеся с фиксированным (между группами) сдвигом фаз. Поэтому, недопустимо исследование одного профиля с использованием условия обобщенной периодичности. В расчетах аэроупругого поведения профилей необходим учет всей решетки.

### **Библиографический список**

1. Г.С. Самойлович. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. М.: издательство «Наука», 1969, 444 стр.
2. Гельмедов Ф.Ш., Гладков Е.П., Сачкова Н.Г., Фатеев В.А., Панков С.В., Петровичев А.М., Шипов Р.А., Халецкий Ю.Д. Расчетно-экспериментальные исследования аэродинамических и акустических характеристик модели С178-1 одноступенчатого вентилятора ТРДД. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2006-2007 гг.), Москва, 2007 г. стр.197-200.
3. В.Н. Ершов. Неустойчивые режимы турбомашин. Вращающийся срыв. М.: издательство «Машиностроение», 1966, 180стр.

### **Сведения об авторах**

Буюкли Татьяна Васильевна, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета), тел. 8 915 496 27 10 e-mail: buyukly@mail.ru.

Шорстов Виктор Александрович, научный сотрудник ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, тел. 8 903 660 13 75, e-mail: vit@balutm.ru.