

Макаров Павел Вячеславович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЛАТТЕРА РАБОЧИХ КОЛЕС КОМПРЕССОРОВ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК
НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальности: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Колотников Михаил Ефимович,
ООО «ДжиИ РУС», начальник отдела

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Фирсанов Валерий Васильевич,
МАИ, заведующий каф. 906

Официальные оппоненты: Антуфьев Борис Андреевич
доктор технических наук, профессор,
МАИ, профессор каф. 902

Коровин Борис Борисович
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ОАО «Летно-исследовательский институт
им. М.М. Громова», начальник лаборатории

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный институт авиацион-
ного моторостроения имени П.И. Баранова»

Защита состоится «27» июня 2012 г. в 15:00 на заседании диссертационного со-
вета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (на-
циональный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва,
А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного
института (национального исследовательского университета).

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба направлять
по указанному адресу в двух экземплярах.

Автореферат разослан «24» мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05,
кандидат физико-математических наук

Федотенков
Григорий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В работе рассматривается актуальная научно-техническая проблема прогнозирования флаттера рабочих колес (РК) компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) на этапе их проектирования. Сам подход к решению рассматриваемой задачи на основе энергетического метода, т.е. оценки направления подвода энергии при обтекании лопаток РК, колеблющихся по собственным формам, относится к числу классических. Однако до настоящего времени решение этой задачи в полной постановке никем не выполнено из-за больших сложностей в численной реализации данного подхода. Существующие в настоящий момент методы прогнозирования флаттера с использованием критериальных соотношений, базирующиеся, в основном на результатах обработки и анализа известных случаев возникновения флаттера в РК, дают достаточно хорошие прогнозы по возникновению флаттера только для конструкций РК и параметрах их работы, близких к рассматриваемым, но не обладают общностью и не позволяют надёжно прогнозировать режимы потери устойчивости РК компрессоров другой конструкции на этапе их проектирования. Поэтому, тема диссертации, посвященная решению задачи прогнозирования условий возникновения флаттера на базе энергетического подхода к рассмотрению этой проблемы и развитию на базе этого решения методики проектирования компрессоров современных газотурбинных двигателей и установок представляет большой научный и практический интерес и является, безусловно, **актуальной**.

Целью работы является разработка и исследование метода прогнозирования флаттера РК компрессоров в условиях безотрывного обтекания на стадии проектирования ГТД и ГТУ, базирующегося на энергетическом подходе. Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

- разработка и обоснование подходов к анализу форм колебаний лопаток РК, по которым наиболее вероятна потеря устойчивости исследуемой ступени компрессора;
- выделение из результатов расчетов стационарного обтекания профилей всего компрессора на заданном режиме работы изделия при условии их обобщенной периодичности граничных условий для исследуемой ступени;
- разработка подхода, алгоритма и программы интерполяции перемещений точек профиля лопатки при её колебаниях по собственным формам на поверхности газодинамических профилей лопаток;
- разработка алгоритма и программы для решения задачи нестационарного обтекания профилей лопаток исследуемой ступени в течение нескольких периодов колебаний при задании граничных условий из стационарного расчета полной модели компрессора и перемещений профилей лопаток по форме собственных колебаний с учетом соответствующего сдвига фаз;
- разработка методик, создание алгоритмов и программных средств для выделения нестационарной части давления от действующих на профиль лопатки аэродинамических сил на периоде собственных колебаний при установив-

шихся параметрах течения;

– разработка методик, создание алгоритмов и программных средств для вычисления работы нестационарных аэродинамических сил на периоде колебаний лопатки по собственной форме. При этом, знак вычисленной работы позволит сделать однозначное заключение об устойчивости или неустойчивости исследуемого РК к флаттеру по заданной форме колебаний на расчетном режиме;

– выполнение исследования влияния параметров численного моделирования на результаты расчета потери устойчивости РК компрессора;

– отработка методики проведения испытаний компрессоров на флаттер и проведение верификации полученных расчетных данных об устойчивости РК к флаттеру по результатам проведенных испытаний;

– разработка сквозного алгоритма проектирования РК современных компрессоров с учётом разработанного расчётного метода прогнозирования флаттера.

Научная новизна. Научная новизна, выполненной в диссертации исследований и полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан, апробирован и верифицирован новый численный метод решения задачи прогнозирования флаттера РК компрессоров, однозначно определяющий условия возникновения флаттера при безотрывном обтекании рабочих лопаток потоком воздуха. Разработанный метод реализует вычисление работы нестационарных аэродинамических сил на упругих перемещениях перьев лопаток, рассматриваемых, как трёхмерные тела, совершающие колебания по собственной форме с заданным сдвигом фаз. При этом знак вычисленной работы однозначно определяет отсутствие или наличие флаттера лопаток рабочего колеса в рассматриваемых условиях. Разработанный метод интегрирован в процесс проектирования высоконагруженных компрессоров современных ГТД и позволяет на ранних стадиях проекта осуществлять отстройку РК от условий возникновения флаттера при работе компрессора на линии рабочих режимах и при его поджатии в сторону границы устойчивости до появления срывных явлений.
2. Установлено, что для корректного определения знака работы аэродинамических сил при интегрировании по поверхности лопатки на периоде собственных колебаний, необходим учет только нестационарной части давления, т.к. учет полного давления (включая стационарную часть) может привести к ошибочному результату вследствие погрешности, возникающей при вычислении работы.
3. Показано, что для корректного определения условий возникновения флаттера в РК, необходимо учитывать вклад всех сечений при определении работы аэродинамических сил на упругих перемещениях лопаток при колебаниях по собственной форме, хотя для бандажированных колёс, для которых основной вклад в работу вносится периферийными сечениями на относительной высоте лопатки, близкой к 90%, в ряде случаев можно пользоваться оценкой знака работы только на этой высоте, что и предлагается рядом исследователей. Однако, при смещении узловой линии фор-

мы колебаний и при рассмотрении других видов конструкций РК, данное сечение не в полной мере определяет потерю устойчивости всего РК, и поэтому необходим учет вклада работы всех сечений лопатки.

4. Доказано, что для достоверного прогнозирования условий возникновения флаттера при безотрывном обтекании достаточно использовать модель исследуемой ступени, состоящую из трёх лопаточных профилей, а расчёт работы нестационарных аэродинамических сил производить на третьем периоде колебаний.

Все существенные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, являются новыми.

Достоверность разработанного метода прогнозирования флаттера РК компрессоров и полученных в диссертации результатов обусловлена использованием современных численных методов и корректностью подходов к решению задач аэроупругости, выполненными исследованиями влияния параметров используемых моделей на получаемые результаты и подтверждается успешной верификацией полученных расчетных данных об устойчивости РК к флаттеру по результатам проведенных испытаний натуральных компрессоров на стендах ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» и ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что разработанный алгоритм и его численная реализация позволяют выполнять исследования условий возникновения флаттера РК компрессоров современных ГТД и ГТУ на стадии проектирования с использованием стандартных программных средств, таких как (Ansys CFX, Star-CD, Fluent, FlowVision и т.п.).

Использование предложенного алгоритма сквозного проектирования РК современных компрессоров, включающего разработанный расчётный метод прогнозирования флаттера, позволит существенно сократить сроки их доводки по характеристикам динамической прочности и снизить затраты на их создание.

Важное научное и практическое значение имеют методика и результаты проведенных экспериментальных исследований условий возникновения флаттера РК компрессоров при проведении специальных стендовых испытаний полноразмерных двигателей.

Апробация работы. Результаты работы получены при выполнении НИР «Вентилятор-ПИ» в рамках ФЦП "Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007-2010 г. и на период до 2015 г." Минпромторга РФ (контракт №АВ/07/884/ОП К/К от 07.12.2007г.).

Результаты работы докладывались и обсуждались на X научно-техническом конгрессе по двигателестроению (Москва, 2008), на международном конгрессе двигателестроителей (Рыбачье, 2008-2010), на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2009 и 2011), на III международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 2010), на IV международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении» (Киев, 2011), на XI международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2011) и на XVIII

международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (Ярополец, 2012).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём работы составляет 160 страниц печатного текста, включая 83 иллюстрации и 3 таблицы. Список литературы содержит 74 наименования. По теме диссертации опубликовано 12 работ, 3 из них – в изданиях из списка ВАК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы разработки эффективного метода прогнозирования флаттера РК компрессоров на этапе проектирования. В сжатой форме приводится хронологическое описание её исследования и состояние разработки на текущий момент.

В частности, отмечается, что проблема надежного прогнозирования флаттера РК компрессоров и создание методов проектирования, исключающих появление флаттера во всем эксплуатационном диапазоне работы компрессора, остается на текущий момент неразрешенной, а разработка методов ее решения является чрезвычайно актуальной задачей.

В первой главе даётся литературный обзор, излагаются физические основы проблемы, приводятся расчетные и экспериментальные методы её решения, формулируются цели и задачи исследования.

В разделе 1.1. описываются особенности колебаний РК компрессоров, причины, виды и механизмы их возникновения. Описаны виды связей в РК, преимущества и недостатки различных схем РК. Отмечено влияние отклонения РК от строгой поворотной симметрии на характер колебаний, что может быть вызвано точностью формообразования (особенно это характерно для конструкций типа "блиск") и монтажа элементов конструкции РК, неоднородностью свойств материалов и вносимой условиями работы (температура, деформация и пр.), а также целенаправленным введением так называемой "расстройки" РК (изготовления лопаток по разным чертежам) для отстройки от флаттера.

Обобщив исследования флаттера компрессорных лопаток советских и зарубежных ученых, А.А. Хориковым была выделена зависимость величины расстройки лопаток от полученного значения аэродинамического демпфирования – основного показателя чувствительности к флаттеру (рис. 1). Из нее можно выделить две зоны нечувствительности: I – при малых значениях расстройки лопаток и III – при достаточно больших значениях расстройки; а также зону II, обладающую почти линейной зависимостью аэродинамического демпфирования от величины расстройки.

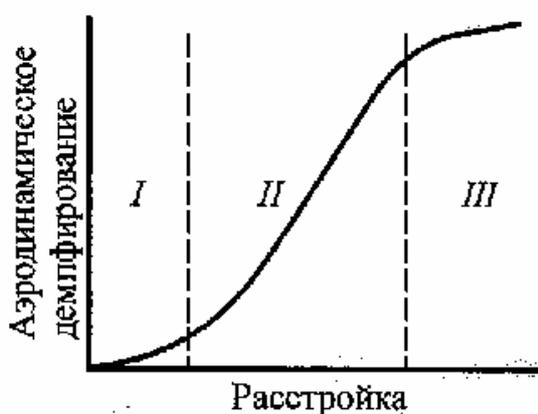


Рис. 1. Зависимость аэродинамического демпфирования от величины расстройки комплекта лопаток рабочего колеса компрессора

намического демпфирования от величины расстройки. Такая зависимость индивидуальна для определенной конструкции РК, его инерционно-массовых характеристик, и зависит от значений остальных аэроупругих факторов. Влияние расстройки РК должно быть оценено при прогнозировании флаттера.

В разделе 1.2. дается классификация и описание основных видов флаттера применительно к карте рабочих режимов осевых компрессоров. Показано, что на основе обобщения опыта экспериментальных исследований, данная классификация у различных авторов, таких как А.В. Шринивасан, О. Бендиксен, Х. Дои, П. Репар, А. Мак-Ги, П. Якобс, Р. Голлан, Л.И. Снайдер, Г.Л. Коммерфорд, Д. Г. Маршалл, М. Имреган, А.А. Хориков и др., имеет как общие зоны различных видов флаттера, так и индивидуальные, которые связаны с особенностями обтекания лопаток потоком воздуха.

В разделе 1.3. рассматриваются основные критерии прогнозирования флаттера, излагаются преимущества и недостатки различных подходов. Отмечено, что наиболее распространенным подходом, является эмпирический, основанный на критериальных оценках. Одним из наиболее простых критериев, является число Струхаля:

$$Sh = \frac{\omega \cdot b}{W} > C,$$

где b – хорда периферийного сечения лопатки; ω – частота ее колебаний в рад/с; W – скорость набегающего потока, C – некоторая величина, определенная для конкретной формы колебаний на основе экспериментальных данных. Однако, данный критерий не позволяет дать полную уверенность в отстройке от флаттера. Подходы для прогнозирования флаттера, базирующиеся на обобщении экспериментальных данных методами математической статистики, которые были предложены Е.А. Локштановым, также ограничены банком данных о виде флаттера и конструктивной особенностью исследованного РК, что ограничивает их применение.

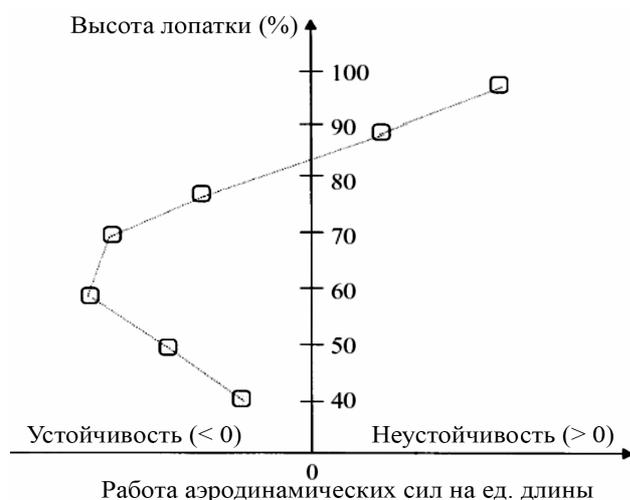


Рис. 2. Результаты анализа устойчивости энергетическим методом

Численные методы, основанные на решении аэроупругой задачи на собственные значения и на вычислении работы, произведенной нестационарными (линеаризованными либо нелинейными) аэродинамическими силами, применяются в постановке для некоторого числа двумерных профилей. На рис. 2 показан пример такого расчета энергетическим методом. Из которого видно, что результат расчета устойчивости отдельно взятого сечения может не совпадать с суммарной интегральной величиной работы нестационарных

аэродинамических сил по всей высоте лопатки.

В разделе 1.4. приводятся методы диагностики флаттера при экспериментальных исследованиях. Дается описание испытательных стендов на проверку отсутствия флаттера РК, условий проведения испытаний, схем препарирования, измерительной аппаратуры, методик обработки результатов испытаний. Отмечено, что существующие методики диагностики флаттера, разработанные ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», позволяют на стадии доводки изделия надежно диагностировать флаттер РК компрессоров с помощью контактных (тензорезисторы на рабочих лопатках) и бесконтактных (виброакустические датчики на корпусах) средств измерений как в темпе эксперимента, так и в процессе пост-обработки данных испытаний. Однако они являются весьма затратными по времени и средствам, поскольку требуют проведения специальных стендовых или лётных испытаний, специального препарирования и измерительного оборудования, программного комплекса для обработки результатов и высококвалифицированного персонала. При этом, для отработки мероприятий по повышению устойчивости создаваемого компрессора к флаттеру и их проверке, требуется повторение всего комплекса испытаний, что существенно увеличивает сроки создания компрессора.

Во второй главе приводятся разработанные алгоритмы и программы для реализации метода прогнозирования флаттера РК компрессоров в условиях безотрывного обтекания на стадии проектирования ГТД и ГТУ, базирующегося на энергетическом подходе. Решены поставленные задачи исследования.

В разделе 2.1. приводятся особенности расчета собственных частот и форм колебаний РК компрессоров применительно к прогнозированию флаттера. Показано, что изменение частот и форм собственных колебаний лопаток вентилятора может быть вызвано увеличением числа узловых диаметров, податливостью диска и учетом монтажного натяга между бандажными полками лопаток. Продемонстрирована необходимость проведения расчетного определения форм собственных колебаний РК в составе ротора. Сформулированы практические рекомендации по разработке конечно-элементных моделей. Выявлены характерные особенности определения картины перемещений современной широкохордной лопатки вентилятора при колебаниях по собственным формам для прогнозирования флаттера РК (рис. 3).

В разделе 2.2. рассматриваются особенности расчета параметров течения в межлопаточных каналах. Для расчета РК компрессоров на флаттер выбираются режимы работы компрессора с необходимыми запасами по температуре, давлению и коэффициенту режима. Такие режимы определяются из стационарных режимов, рассчитанных для линии рабочих режимов всего компрессора, путем пересчета с учетом запасов по необходимым параметрам. Эта часть выполняется специалистами по аэродинамике, имеющими опыт в решении подобных задач.

Решение задачи о возникновении флаттера, в основном, ограничено безотрывным обтеканием профилей, которое имеет устойчивое стационарное решение, в отличие от срывного обтекания, для которого порой даже нет адекватной математической модели описывающей течение. На этапе проектирования ком-

прессора важно знать, что компрессор обладает соответствующими техниче-

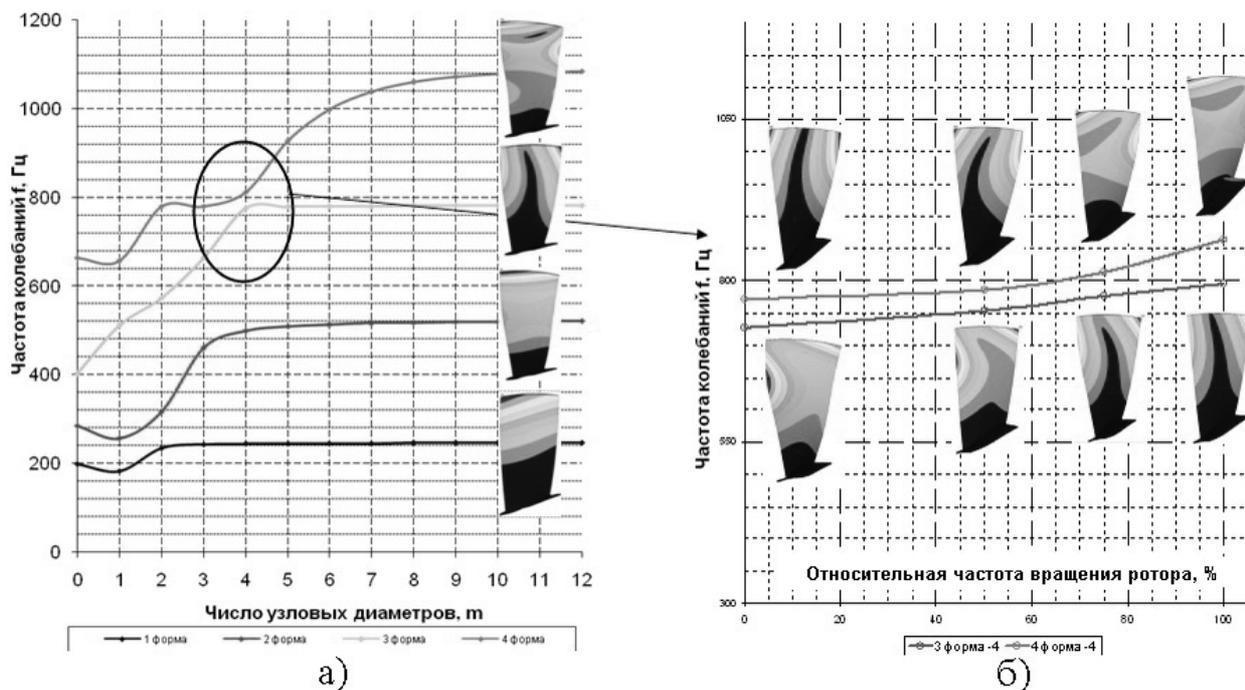


Рис. 3. Склонность РК вентилятора с широкохордными лопатками к изгибно-крутильному флаттеру: а) близость собственных частот на дисперсионной диаграмме; б) перестроение по частоте вращения ротора 2-ой изгибной и 1-ой крутильной форм колебаний при $m=4$

кому заданию параметрами и свободен от флаттера.

Для расчета нестационарного течения строится модель исследуемого РК путем вычленения из полной модели компрессора и приложения к ней граничных условий на входе и выходе, взятых из сквозного расчёта всего компрессора. Для исключения анализа резонансных явлений при расчете нестационарного обтекания РК компрессора, вызванных следами от направляющих аппаратов, при расчете стационарного обтекания лопаток в составе полной модели компрессора выполняется осреднение параметров потока на границах ступеней. Для учета направления движения волны деформаций при колебаниях по собственной форме, что характерно для флаттера, а также для воспроизведения соответствующего определенного сдвига фаз колебаний (числу узловых диаметров) $\alpha = 2\pi m/N$, характерного для данного узлового диаметра m (N – количество лопаток в колесе), создается модель, состоящая из нескольких подряд стоящих лопаток одного рабочего колеса. Таким образом, учитывается запаздывание $\sin(\omega t - \alpha)$ и опережение $\sin(\omega t + \alpha)$ амплитуд колебаний соседних профилей по времени и изменение закона перемещений при колебаниях по заданной собственной форме. Для задания граничных условий на входе и выходе многолопаточной модели, применяются алгоритмы численного преобразования координат для смежных с исходной профилей лопаток. Для оценки влияния незначительного изменения угла атаки (до $\pm 5^\circ$) на потерю устойчивости РК, например, при отклонении от программы регулирования направляющими аппаратами и неточностями их установки, выполняется матричное преобразование компонент вектора скорости на необходимый угол изменения угла атаки $\pm \Delta i$. Это позволяет

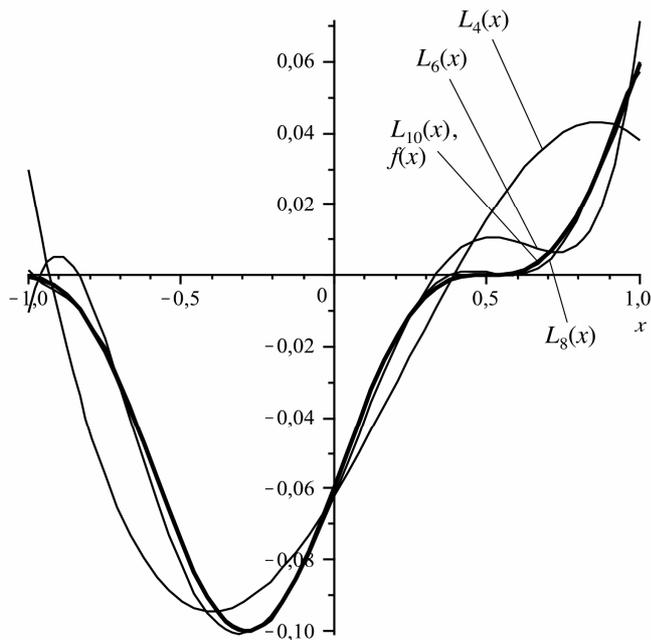


Рис. 4. Функция $0.1 \sin(2(x-0.5))^3$ (жирная линия) и её интерполяционные многочлены Лагранжа на отрезке $[-1; 1]$

при $n = 4, 6, 8, 10$. Видно, что при $n=10$ график многочлена полностью сливается с исходной функцией, а погрешность интерполяции $\delta < 0.003$. Аналогичная зависимость погрешности от числа точек интерполирования наблюдается и для других не слишком быстро осциллирующих функций. Так как собственные колебания лопатки, по которым обычно происходит возбуждение флаттера, не являются быстро осциллирующими функциями, получаем, что 10-ти точек интерполяции полиномами Лагранжа вполне достаточно для высокоточного описания формы прогиба.

В случае функции двух переменных, применительно к лопатке РК компрессора, создаются совпадающие системы координат анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и газодинамического расчета (x', y', z') , так чтобы поверхности спинки (ψ^-) и корыта (ψ^+) лопатки могли быть заданы в виде однозначной функции (рис. 5):

$$y' = \psi \pm (x', z')$$

Таким

образом,

избежать пересчета стационарного расчета полной модели компрессора. Однако для больших изменений угла атаки требуется его обязательный пересчет.

В разделе 2.3. изложена методика передачи закона движения лопатки при колебаниях по собственной форме в нестационарный расчет газовой динамики с подвижной конечно-объемной сеткой. Для интерполяции перемещений применяются полиномы Лагранжа:

$L_n(x) = a_N x^N + a_{N-1} x^{N-1} + \dots + a_1 x + a_0$, где $N = n - 1$, n - число точек интерполяции, а коэффициенты a_N вычисляются через значения функций $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$.

На рис. 4 показаны функция и её интерполяционные многочлены

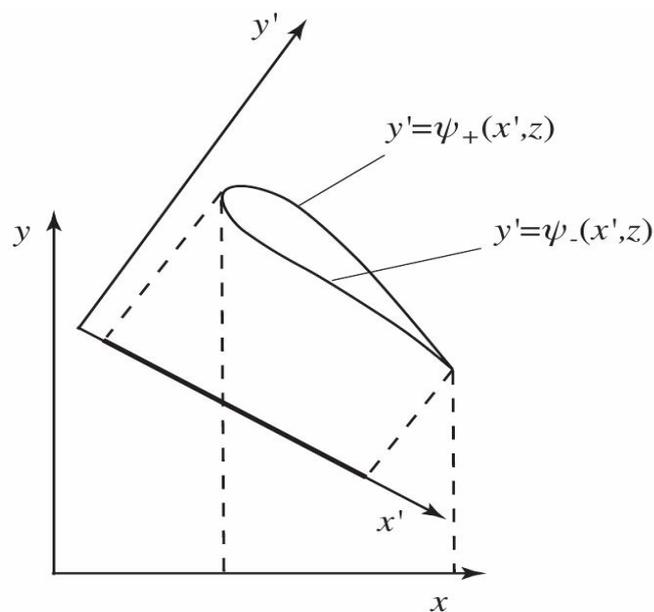


Рис. 5. Повернутая декартова система координат (x', y', z') для проведения интерполяции перемещений по собственным формам колебаний лопатки из пакета для анализа НДС в газодинамический

прямоугольник $[x'_0; x'_n] \times [y'_0; y']$ преобразуется в квадрат $[-1; 1] \times [-1; 1]$, а значения функции $f(x', y')$ нормируется. На основе созданного алгоритма реализована программа интерполяции перемещений точек профиля лопатки при её колебаниях по собственным формам на поверхности газодинамических профилей лопаток.

В разделе 2.4. изложена методика, описывается алгоритм и программа для выделения нестационарной части давления от действующих на профиль лопатки аэродинамических сил на периоде собственных колебаний при установившихся параметрах течения, а также программа для вычисления работы нестационарных аэродинамических сил на периоде колебаний лопатки, которые по знаку подводимой работы позволяют сделать заключение об устойчивости исследуемого РК к флаттеру по заданной форме колебаний и заданном режиме.

Принимается допущение, что на границе устойчивости РК закон изменения возмущений потока вследствие колебаний лопатки является гармоническим. По результатам нестационарного расчёта последнего заданного периода колебаний, определяется возмущения аэродинамических сил $\bar{p}(x; y; z; t)$, возникающих в потоке при принудительных колебаниях лопатки с собственной вещественной частотой ω по собственной форме:

$$p(x, y, z, t) = p_0(x, y, z) + P(x, y, z) \sin(\omega t - \varphi(x, y, z)),$$

где $p_0(x, y, z)$ - невозмущенное давление потока.

Работа, совершаемая нестационарным газодинамическим давлением на заданных перемещениях лопатки при ее колебаниях по собственной форме, вычисляется как

$$A = \int_{t_0}^{t_0 + T} \int_S \bar{p}(x, y, z, t) \cdot \vec{v}(x, y, z, t) ds dt. \quad (1)$$

Здесь $T = 2\pi/\omega = 1/\Omega$ – период колебаний лопатки в вакууме (Ω – физическая частота колебаний лопатки, ω - круговая частота), S – поверхность лопатки, \bar{p} – вектор распределения давления в потоке по профилю лопатки, $\vec{v} = \partial u / \partial t$ – скорость движения точек лопатки.

Полное давление, получаемое для каждого элемента лопатки, состоит из преобладающей величины стационарной части и очень маленькой составляющей нестационарной (близкой к нулю), вследствие малых возмущений потока при малых амплитудах колебаний. Эта малая величина и определяет устойчивость рабочего колеса, однако, при интегрировании полного давления по высоте лопатки, при вычитании одинаково больших величин, она может быть неправильно учтена вследствие накапливаемой погрешности вычислений при интегрировании работы нестационарных аэродинамических сил. Поэтому, в формуле (1) под давлением понимается только его нестационарная часть.

Критерием возникновения флаттера является условие положительной алгебраической суммы работ аэродинамических сил и сил конструкционного демпфирования $A + A_2 > 0$. Ввиду малости величины работы сил конструкци-

онного демпфирования для компрессорных лопаток $|A_2| \ll A$, в качестве запаса отстройки от области флаттера (в связи с различными допусками на геометрические параметры и параметры двигателя при работе), данной величиной можно пренебречь.

Тогда, если величина A положительна, то флаттер возникнет, в противном случае – нет. Таким образом, критерием устойчивости рабочего колеса к флаттеру является неравенство

$$A \leq 0,$$

которое должно быть выполнено для каждой моды колебаний.

В третьей главе проведено моделирование аэроупругих нестационарных явлений на примере РК 1 и 2 ступеней эксплуатируемого вентилятора ГТД семейства АЛ-31Ф. По знаку работы нестационарных сил на упругих перемещениях лопаток по собственным формам колебаний, выявлены режимы и формы собственных колебаний, по которым происходит потеря устойчивости РК. Проведено исследование влияния параметров численного моделирования на результаты потери устойчивости рассматриваемых РК.

Отмечается, что для бандажированных конструкций РК вентилятора на стадии проектирования всегда должны рассматриваться два случая опирания по бандажным полкам:

- при сохранении бандажной связи в течение всего периода эксплуатации;
- при случайной потере бандажных связей - консольный вариант, например из-за износа контактных поверхностей бандажных полок, нахлеста, связанного с попаданием постороннего предмета или птицы, или по каким-либо другим причинам.

В разделе 3.1. описывается моделирование нестационарного обтекания РК 2 ступени, проведенного для двух схем колебаний лопаток: 1) по формам колебаний лопаток с опиранием по бандажным полкам (исходный вариант); 2) по формам колебаний не опертой (консольной) лопатки. Частота вращения и начальные условия обтекания (результаты стационарного расчета) приняты одинаковыми для обоих расчетных случаев. Режим принят земной $H=0$, $M=0$ с нормальными условиями на входе ($T_{вх}=15$ °С, $p_{вх}=1$ атм.), соответствующий верификационным экспериментам. Рассматриваются четыре низшие формы колебаний с воспроизведением бегущих волн деформаций по всем реализуемым числам узловых диаметров ($\pm m$) и в отсутствии таковых ($m=0$).

Работа нестационарных аэродинамических сил, вычисленная на режиме $n_{пр}=0.8$ для рассчитанных форм колебаний бандажированного колеса второй ступени отрицательна. Таким образом, прогнозируется устойчивость РК рассматриваемой ступени при опирании лопаток в бандаже. При отсутствии опирания по бандажным полкам в РК (консольный вариант) прогнозируется возбуждение флаттерных колебаний лопаток по второй и третьей формам при колебаниях с 5–11 и 5–16 узловыми диаметрами, соответственно.

На рис. 6, 7 показано, что положительная работа нестационарных аэродинамических сил A на высоте лопатки $\bar{h} = 90\%$ от обода диска не определяет потерю устойчивости консольной лопатки 2 ступени вентилятора по 4-ой форме колебаний и бандажированной лопатки 2 ступени вентилятора по 2-ой форме колебаний, соответственно, т.к. суммарная работа по всем сечениям лопатки отрицательна. Поэтому очень важен учет вклада работы нестационарных аэродинамических сил каждого сечения лопатки в суммарную величину работы, что определяет её предрасположенность к флаттеру.



Рис. 6.



Рис. 7.

В процессе исследований выполнен комплекс расчетно-экспериментальных работ, подтвердивший корректность расчета частот, распределения напряжений и перемещений по собственным формам колебаний РК для условий нулевой частоты вращения ротора.

В разделе 3.2. описывается моделирование нестационарного обтекания бандажированного РК 1 ступени, проведенного для двух режимов работы вентилятора: 1) $p_{ex}=2.6$ атм., $T_{ex}=150$ °С, $n_{lnp}=77.4\%$ ($n_{lf}=93.84\%$); 2) $p_{ex}=1$ атм., $T_{ex}=15$ °С, $n_{lnp}=100\%$ ($n_{lf}=100\%$). Рассматриваются три низших формы колебаний, относящиеся к двум семействам собственных форм опертой по бандажным полкам лопатки: изгибных форм (1-я форма) и изгибно-крутильных форм (2-я и 3-я формы).

Работа нестационарных аэродинамических сил, вычисленная на режиме $n_{lnp}=77.4\%$ по форме 2-го семейства изгибно-крутильных форм колебаний, оказалась положительной для чисел узловых диаметров $m=5..9$. По результатам распределения нестационарного давления по поверхности лопатки, можно сделать вывод о преимущественном подводе положительной работы при флаттере сечениях от 90 до 100 % высоты лопатки от обода диска. По другой форме колебаний и на другом рассмотренном режиме прогнозируется устойчивость.

В разделе 3.3. на моделях РК 1 и 2 ступени эксплуатируемого вентилятора, демонстрируется возможность проверки параметров численного моделирования в программном комплексе *ANSYS CFX* на результаты потери устойчивости РК.

- На знак работы нестационарных аэродинамических сил **не оказывают** существенного влияния следующие рассмотренные параметры моделирования:

- количество числа итераций за период колебаний более 100;

- количество расчетных периодов колебаний более 3;
 - величина невязки сходимости решения;
 - величина турбулентных пульсаций на входе в исследуемое колесо для модели $k-\varepsilon$;
 - величина амплитуды колебаний;
 - количество моделируемых каналов течения более 3;
 - изменение угла атаки на входе в ступень в пределах $\pm 4^\circ$.
- На знак работы нестационарных аэродинамических сил **могут оказать** влияние следующие рассмотренные параметры:
 - моделирование в аэродинамической модели бандажных полок;
 - размерность конечно-объемной сетки;
 - изменение угла атаки на входе в ступень более $\pm 4^\circ$;
 - отклонение узловой линии собственной формы колебаний.

Разработанные подходы по проверке параметров моделирования нестационарного обтекания рабочих колес компрессоров на предмет их устойчивости к флаттеру применимы для других моделей РК компрессоров и в других программных комплексах. Они подлежат уточнению с помощью описанных в данной главе подходов.

В четвертой главе с целью верификации разработанного подхода расчетного прогнозирования флаттера приводятся результаты выполненного комплекса экспериментальных исследований флаттера РК 1 и 2 ступеней эксплуатируемого вентилятора ГТД семейства АЛ-31Ф. Отработаны процедуры подготовки и проведения испытаний на автоколебания, в том числе диагностики нерезонансных колебаний как по результатам обработки записанных сигналов динамических процессов, так и в темпе эксперимента. Получены следующие результаты:

1. Методом прямого тензометрирования бандажированной рабочей лопатки 2-й ступени в составе двигателя при атмосферных условиях на входе показано, что во всем диапазоне частот вращения ротора низкого давления флаттер отсутствует, что полностью совпадает с выполненным в разделе 3.1 расчетным прогнозом.

2. Методом прямого тензометрирования не опертой по бандажным полкам (консольной) рабочей лопатки 2-й ступени в составе двигателя при атмосферных условиях на входе, показано, что при выходе на режим $n_{1\text{физ}}=70\%$, флаттер возникает по 2-ой и 3-ей формам колебаний. Поскольку с увеличением частоты вращения в эксперименте наблюдалось увеличение амплитуды колебаний при флаттере, достичь расчетного режима $n_{1\text{ф}}=80\%$ из-за опасности быстрого разрушения компрессора не удалось. Однако можно однозначно утверждать, что на этом режиме ($n_{1\text{ф}}=80\%$) имел бы место флаттер. Получено полное совпадение экспериментальных коэффициентов пересчета и расчетного распределения напряжений при флаттере. При этом площадки сдвигов фаз колебаний свидетельствуют о реализации 6 и 7 узловых диаметров для 2 формы колебаний и 5, 11-14 узловых диаметров для 3 формы колебаний, что совпадает с выполненным в разделе 3.1 расчетным прогнозом.

3. Разработанная методика прогнозирования флаттера была верифицирова-

на по результатам ранее проведенных испытаний на автоколебания бандажированного РК 1 ступени вентилятора в составе двигателя на высотном стенде ЦИАМ Ц-4Н, при которых имел место флаттер в рабочих лопатках 1 ступени. Выполненные расчетные исследования в разделе 3.2 подтвердили возможность возникновения флаттера на режимах, реализованных в процессе указанных выше испытаний двигателя.

Таким образом, все полученные в главе 3 результаты по прогнозированию флаттера РК 1 и 2 ступеней эксплуатируемого вентилятора ГТД семейства АЛ-31Ф были верифицированы экспериментальными исследованиями флаттера рассматриваемых РК в составе двигателя.

Непосредственно автором были подготовлены, проведены и обработаны испытания РК 2 ступени вентилятора в составе двигателя на стендах ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют". Для испытаний по проверке отсутствия автоколебаний РК 1 ступени вентилятора в составе двигателя на высотном стенде Ц-4Н ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", автором была выполнена подготовка к испытаниям, а по результатам - обработка данных испытаний.

В пятой главе на базе использования разработанного метода прогнозирования флаттера РК создан алгоритм и дополнена схема проектирования современных компрессоров (рис. 8, 9), включающая итерационную процедуру последовательного решения задач аэродинамики, прочности и аэроупругости и позволяющая разработчикам компрессоров уже на стадии их проектирования осуществлять отстройку от режимов возникновения флаттера, что обеспечивает уменьшение сроков и стоимости доводки компрессоров.



Рис. 8. Фрагмент блок-схемы процесса создания компрессора (рис. 9) в части расчётного прогнозирования флаттера

Основные результаты, полученные в диссертационной работе и выносимые на защиту.

В результате выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, посвящённого решению важной научной проблемы, а именно изучению условий возникновения флаттера РК современных компрессоров в условиях работы исследуемой ступени при безотрывном обтекании, получены следующие новые научные и практические результаты:

1. На базе общей формулировки энергетического подхода к решению задачи о прогнозировании флаттера впервые разработан, исследован и научно обоснован метод прогнозирования флаттера РК компрессоров ГТД и ГТУ в условиях безотрывного обтекания их потоком воздуха, реализующий вычисление и определение знака интегральной работы нестационарных аэродинамических сил на упругих перемещениях **трёхмерного профиля лопатки**, колеблющейся по собственной форме с учетом определенного сдвига фаз. Разработанный метод позволяет на ранних этапах проектирования компрессора прогнозировать режимы его работы, где возможно возникновение флаттера.
2. На базе разработанного метода прогнозирования флаттера РК создан алгоритм и дополнена схема проектирования современных компрессоров, включающая итерационную процедуру последовательного решения задач аэродинамики, прочности и аэроупругости и позволяющая разработчикам компрессоров уже на стадии их проектирования осуществлять отстройку от режимов возникновения флаттера, что обеспечивает уменьшение сроков и стоимости доводки компрессоров.
3. Изучены особенности и разработаны рекомендации по исследованию собственных форм колебаний РК компрессоров, при реализации которых наиболее вероятно возникновение флаттера. Исследованы закономерности изменения картины перемещений профильной части лопаток по частоте вращения ротора при колебаниях по собственной форме и влияние на изменение этой картины характера взаимодействия лопаток с диском.
4. На базе использования интерполяционных полиномов Лагранжа разработан подход, созданы и исследованы алгоритм и программное обеспечение для описания изменения формы межлопаточных каналов вследствие перемещений точек профиля лопатки при её колебаниях по собственным формам, что обеспечило возможность разработки алгоритмов и создания программы расчёта параметров нестационарного обтекания профилей лопаток компрессора, колеблющихся по собственным формам.
5. Решена задача о выделении нестационарной части давления от действующих на профиль лопатки аэродинамических сил на периоде собственных колебаний и разработана программа по вычислению работы нестационарных аэродинамических сил на периоде колебаний лопатки, по знаку которой можно судить об устойчивости исследуемого РК к флаттеру по заданной форме колебаний на расчетном режиме.
6. Исследовано влияние параметров численного моделирования в программном комплексе *Ansys CFX* на результаты прогноза потери устойчи-

вости РК компрессора по разработанному методу. Показано, что повышение точности вычислений параметров, варьирование угла атаки в пределах допусков на регулирование направляющими аппаратами, влияния уровня турбулентности на входе в ступень, амплитуды колебаний лопатки не оказывают значимого влияния на результат прогнозирования условий возникновения флаттера. Наибольшее влияние оказывают выбор параметров дискретизации конечно-объемной газодинамической сетки и положения узловых линий при колебаниях по собственной форме. Определено, что для достоверного прогнозирования условий возникновения флаттера при безотрывном обтекании достаточно использовать модель исследуемой ступени, состоящую из трёх лопаточных профилей, а расчет работы нестационарных аэродинамических сил производить на третьем периоде колебаний, при дискретизации периода 100 итерациями.

7. Для РК 1 и 2 ступеней вентилятора эксплуатируемого двигателя семейства АЛ-31Ф выполнены расчеты устойчивости к флаттеру на различных режимах. Показано, что вклад работы в сечении бандажированной лопатки на высоте 90% от обода диска является определяющим устойчивостью к флаттеру всего РК, что подтверждает результаты многочисленных исследований подобных конструкций и работоспособность разработанного метода. Однако, при смещении узловой линии формы колебаний, что возможно из-за разброса геометрических параметров лопаток в РК и при различных числах узловых диаметров, данное сечение уже не является определяющим, и поэтому для корректного прогноза возможности возникновения флаттера необходим анализ знака интегральной работы нестационарных аэродинамических сил на упругих перемещениях всей поверхности лопатки.

Спрогнозированные на базе разработанного в диссертации метода режимы работы двигателя семейства АЛ-31Ф, где должен был возникнуть флаттер рабочих лопаток 1-ой и 2-ой ступеней вентилятора, полностью подтвердились результатами испытаний указанного двигателя на автоколебания, что даёт основание сделать заключение об успешной верификации предложенного метода прогнозирования флаттера РК компрессоров современных двигателей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Колотников М.Е., Макаров П.В. Проблемы обеспечения прочности и ресурса современных авиационных газотурбинных двигателей // Сборник тезисов X Научно-технического конгресса по двигателестроению. М.: ВВЦ, 2008, С.21-22.
2. Колотников М.Е., Макаров П.В., Сачин В.М. Исследование динамической напряженности широкохордного вентилятора при стендовых испытаниях // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. №9 (56). С.58-64.
3. Макаров П.В., Макарова М.Б., Шатная Е.Е. Особенности изменения частотной характеристики рабочего колеса «блиск» с широкохордными лопатками в условиях флаттера // Материалы Международной научно-технической

конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, СГАУ, 24-26 июня 2009г. С.203-204.

4. Колотников М.Е., Макаров П.В. Один из подходов к оценке динамической напряженности лопаток вентилятора при тензометрировании // Вестник двигателестроения. 2009, №3. С.176-180.

5. Колотников М.Е., Макаров П.В., Сачин В.М. Анализ изменения частоты колебаний рабочего колеса вентилятора блисковой конструкции при флаттере // Тезисы докладов XIV Международного конгресса двигателестроителей. Харьков, 2009, С.30.

6. Макаров П.В. Автоматизация процесса обработки данных тензометрирования в программном комплексе WinПОС // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. №9 (76). С.125-127.

7. Колотников М.Е., Макаров П.В. Проблемы доводки широкохордных лопаток вентилятора по динамической прочности // Сборник тезисов III Международной Научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века», Москва. 2010. С.623-626.

8. Колотников М.Е., Веденеев В.В., Макаров П.В. Расчетное прогнозирование решетчатого флаттера лопаток компрессоров современных ГТД // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении». Киев: ИПП им. Г.С.Писаренко. 2011. С.103-104.

9. Колотников М.Е., Веденеев В.В., Макаров П.В., Фирсанов В.В. Трехмерное моделирование флаттера лопаток компрессоров современных ГТД // Вестник СГАУ, 2011, №3(27) часть 1. С.47-56.

10. Колотников М.Е., Веденеев В.В., Макаров П.В. Расчет флаттера рабочих колес компрессоров ГТД в 3D постановке // Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред», Ярополец, 13-17 февраля 2012г., 2 том. С.16-18.

11. Фирсанов В.В., Макаров П.В. Особенности расчета собственных частот и форм колебаний рабочих колес компрессоров ГТД применительно к решению задачи флаттера [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2012. №55. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/>

12. Макаров П.В. Исследование флаттера рабочего колеса 2 ступени вентилятора ГТД при различном опирании лопаток по бандажным полкам // Вестник Московского авиационного института, 2012, т. 19, №3. С. 101-111.

Подписано в печать: 23.05.2012
Объем: 1,0 п.л
Тираж: 100 экз. Заказ № 159
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, Страстной бульвар, д. 6, стр. 1
(495) 978-43-34; www.reglet.ru