

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Абдухакимова Фарруха Адхамовича
на тему: «Новые задачи флаттера авиационных конструкций»
по специальности 1.1.9 Механика жидкости газа и плазмы**

Актуальность

Проблема обеспечения аэроупругой неустойчивости (флаттера) актуальна для тонкостенных конструктивных элементов изделий авиационно-космической техники, высокоскоростных транспортных систем и строительных объектов, работающих при воздействии мощных потоков воздуха. Начиная с классических работ, выполненных в Германии, Великобритании и СССР в 20-30 годы прошлого века изучению флаттера было посвящено значительное число работ. Фундаментальны результаты применительно к флаттеру самолета были получены в ЦАГИ им. Н.Э.Жуковского в 1930 – 1940 гг. Это позволило обеспечить увеличение скорости и безопасности полета, разрабатываемых в СССР перспективных самолетов. Актуальность и важность проблем моделирования флаттера подтверждается тем, что на Всесоюзных конференциях по теории пластин и оболочек, проходивших во второй половине 20 века в СССР, было представлено значительное число докладов, посвященных потере устойчивости конструкций, в том числе и при динамическом взаимодействии с потоком. На рубеже 50-60 гг. прошлого века на основе опыта создания и испытаний авиационно-космической техники были обозначены основные виды флаттера. Изучение их велось как экспериментально, так и теоретически различными коллективами. Существенный вклад в изучение проблемы внесла школа Механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Теоретические работы опирались, в основном, на математический аппарат нелинейной теории упругости и газовой динамики. Бурное развитие вычислительной техники, методов и моделей вычислительной механики позволили в последнее время получить новые результаты в проблеме изучения флаттера. Отметим ряд работ

научного руководителя диссертанта профессора В.В. Веденеева, который, объединив теоретические представления и аппарат вычислительной газовой динамики получил новые результаты при математическом моделировании и оценке возникновения панельного флаттера. Опираясь на подходы своего научного руководителя, диссертант распространил методику многодисциплинарного математического моделирования на исследование условий возникновения: панельного флаттера в определенном диапазоне изменения скоростей потока; автоколебаний лопаток компрессоров ГТД и флаттера лопасти вертолета. Актуальность цели диссертационной работы и постановки диссертантом задач исследования несомненна.

Содержание диссертации.

Диссертационная работа изложена на 152 страницах, включающих введение, четыре главы, заключение, список литературы (171 наименование), 72 рисунка, 5 таблиц и приложение А.

Во введении отмечены актуальность и цели выбранной темы исследования; указаны проблемы, изучению которых посвящены главы диссертационной работы, положения, вынесенные на защиту.

Первая и вторая главы диссертационной работы посвящены исследованию флаттера прямоугольных панелей обшивки при ненулевом угле скольжения и малых сверхзвуковых скоростях потока. В начале первой главы приведен обзор состояния проблемы. Показано, что подавляющее большинство теоретических исследований панельного флаттера было выполнено для больших сверхзвуковых скоростей потока $M \geq 2$, направленного перпендикулярно входной кромке панели. Автор отмечает, что проблеме панельного флаттера при малых сверхзвуковых и трансзвуковых скоростях посвящено небольшое количество исследований, а работы, в которых изучается форма панели и влияние угла скольжения при малых сверхзвуковых

скоростях, отсутствуют. Как показано в ряде работ научного руководителя диссертанта проф. В.В. Веденеева с соавторами при трансзвуковых и малых сверхзвуковых скоростях потока эффекты флаттера существенно связаны колебаниями пластины. Диссертант, в отличие от ранее полученных результатов предшественников, выполнил исследование, рассмотрев новые постановки задач панельного флаттера при малых сверхзвуковых скоростях и произвольных направлениях потока.

В первой главе автор получил уравнения (1.26) для связанной задачи взаимодействия потока, при произвольном угле скольжения относительно границ прямоугольной пластины. В эту систему уравнений вошли волновое уравнение (1.13) для потенциала скоростей в системе координат, связанной с направлением потока и уравнение колебаний тонкостенной пластины (1.15), записанное в координатах параллельных сторонам прямоугольника. Взаимодействие потока пластины потребовало вывода зависимостей для распределения давлений, действующих на пластину. Отметим, что эти давления, перемещения и скорости точек пластины являются начальными условиями на границе между потоком и поверхностью пластины. Следует отметить, что из уравнений (1.26) при не очень прозрачном процессе преобразовании координат и зависимостей для граничных условий не ясно, как реализована окончательная задача на собственные значения (1.68). В какой системе координат записаны уравнения (1.66)?

Численная реализация решения задачи (1.68) выполнена методом Бубнова-Галеркина, который может быть реализован, если разложение функции прогибов (1.67) пластины будет записано только для координат (x,y) . Для подобных задач обтекания прямоугольных панелей метод Бубнова-Галеркина описан в более ранних публикациях, нежели работа [36]. Отмечу фундаментальную книгу А.С. Вольмира. Оболочки в потоке жидкости и газа (задачи аэроупругости). «Наука», 1976.

Оценивая результаты первой главы диссертации, следует отметить, что, по мнению оппонента, они отличаются существенной новизной. При нулевых

углах потока результаты практически совпадают с результатами, полученными ранее В.В. Веденеевым. Диссертант показал, что направление и скорость потока приводят к появлению различных форм реализации флаттера. Важное значение имеет выполненная автором численная оценка сходимости результатов.

Во второй главе диссертации автор выполнил исследование условий возникновения флаттера плоских панелей различной формы. В этом случае сведение задачи к полуаналитическому решению затруднено. Для получения связанной системы уравнений диссертант применил энергетический метод, определяя энергию взаимодействия потока с колеблющейся пластиной. Расчет колебаний пластин выполнен в комплексе программ МКЭ ABAQUS, а аэродинамические – в комплексе ANSYS CFX. Автор организовал работу этих двух комплексов и создал программу оценки знака работы газа, взаимодействующего с пластиной, за период колебаний пластины по исследуемой форме колебаний. Такой подход можно рассматривать, как разработку системы математического моделирования, включающей коммерческие комплексы программ, работающие под управлением программ, созданных автором. Основными являются: 1. Программа интерполяции полиномами Лагранжа распределения перемещений (собственных мод колебаний) пластин в форме трапеции и параллелограмма. С помощью построенных полиномов рассчитанные формы колебаний пластин передаются в аэродинамический расчет; 2. Программа обработки результатов и вычисление работы нестационарных аэродинамических сил и оценки возможности реализации флаттера. Основным замечанием по этой главе является то, что автор традиционно предполагает, что форма колебаний пластины при флаттере совпадает с формой собственных колебаний.

Третья глава диссертации посвящена применению энергетического метода к исследованию флаттера лопаток компрессоров ГТД. Этой проблеме посвящено большое число публикаций в технической литературе. В начале

главы автор привел краткий обзор основных направлений исследования флаттера лопаток компрессоров, и отметил, что учет «тонких» (радиальный зазор, влияние углов установки ВНА, радиальная неравномерность входного потока, монтажные натяги по бандажным полкам), по формулировке автора, конструктивных параметров, практически, не исследован. Отметим, что специалисты, работающие в области авиационного двигателестроения, хорошо знакомы с влиянием вышеперечисленных факторов на развитие автоколебаний лопаток и лопаточных венцов компрессоров ГТД. Можно согласиться с автором только в том, что надежного математического аппарата моделирования автоколебаний в этой проблеме до настоящего времени нет. Поэтому, стремление диссертанта применить энергетический метод к оценке явлений флаттера, следует оценить положительно.

Диссертант разработал вариант автоматизированной системы оценки условий реализации флаттера лопаток компрессоров, состоящей из коммерческих программных комплексов ANSYS CFX, ANSYS Mechanical и собственных программ, осуществляющих управление системой и обработку результатов расчетов. При этом автор модифицировал программы, ранее разработанные с его участием в институте механики МГУ: 1. Программу интерполяции полиномами Лагранжа распределения перемещений (собственных форм колебаний) лопатки; 2. Программу передачи рассчитанных формы колебания лопаток в аэродинамический расчет; 3. Программу обработки результатов и вычисления работы нестационарных аэродинамических сил. С использованием этой автоматизированной системы автор выполнил ряд исследований, демонстрирующих возможности работы автоматизированной системы. Несмотря на то, что при обсуждении результатов диссертационной работы на семинаре отдела «Математического моделирования и САПР ГТД» в ФАУ ЦИАМ им. П. И. Баранова автору были сделаны существенные замечания по постановке решаемых задач (граничные условия с учетом монтажных натягов, уровень геометрической нелинейности при определении

текущего положения вращающейся лопатки), результаты главы следует оценить положительно. Очевидно, что подходы к решению задач флаттера, развиваемые автором, будут восприняты в промышленности, при условии, если в дальнейшей работе автор учтет различные причины возникновения флаттера лопаток компрессоров и то, что в на рабочих режимах компрессора формы колебаний лопаток изменяются и аэродинамическое демпфирование существенно.

В четвертой главе разработана автоматизированная система расчета флаттера лопасти вертолета. Во введении автор диссертации привел обзор работ, посвященных исследованию флаттера лопастей вертолетов. Учитывая, что Россия является ведущей страной, обладающей самой современной отраслью проектирования и производства вертолетов, проблеме флаттера лопастей вертолетов уделяется существенное внимание. Поэтому актуальность постановки задач главы четыре несомненна. Автоматизированная система изучения флаттера лопастей включает: 1. Программу управления расчетами, вычисления аэродинамической жесткости и аэродинамического демпфирования, а также кориолисовой матрицы демпфирования. 2. Программу, реализующую математическую модель исследования флаттера лопасти несущей системы вертолета. 3. Для учета предварительного напряженно-деформированного состояния лопасти (конструкционных матриц масс и жесткости), конструкционного демпфирования, а также создания редуцированной модели лопасти используются разработанные коммерческой программой метода конечных элементов MSC NASTRAN модули на макроязыке DMAP. Организация системы оригинальна и обладает новизной. Отметим, что автор учел аэродинамическое демпфирование, геометрическую нелинейность и ее влияние на изменение формы лопасти и на газодинамические нагрузки. Это позволило исследовать условия реализации флаттера в несущей системе вертолета. Применение теории Флоке и исследование предельных циклов при колебаниях на различных режимах

работы несущей системы вертолета следует считать новым научным результатом.

Замечания

Ряд замечаний оппонент привел при кратком анализе содержания работы. Однако, необходимо сделать более общие замечания:

1. На наш взгляд название диссертационной работы не полностью раскрывает ее направленность. В вышеприведенном обзоре глав диссертации и ее содержания неоднократно отмечено, что диссертант разработал три подхода к решению традиционных задач флаттера с помощью использования технологии многодисциплинарного моделирования, основанной на комбинации коммерческих программных комплексов и собственных алгоритмов, и программ для управления вариантами автоматизированной системы оценки флаттера.
2. В первой главе автор применил метод Бубнова-Галеркина для решения связанной полуаналитической задачи определения условий возникновения флаттера при небольших величинах скорости потока и его отклонении на различные углы, отличающиеся от перпендикулярного к входной кромке панели. Диссертант сослался на методику, приведенную в работе научного руководителя [36]. К сожалению, эта часть работы изложена скупо, и поэтому не ясно в какой форме был применен метод Бубнова-Галеркина (классической – Бубнова или в вариационной – взвешенных невязок). При произвольном угле потока относительно входной кромки панели из-за граничных условий усложняются условия обеспечения ортогональности в задаче на собственные значения. Обсуждение этой проблемы, на наш взгляд, выполнено непрозрачно.
3. Во второй и третьей главах автор применил энергетический подход к исследованию флаттера двух конструктивных элементов. К сожалению, структура системы, разработанной автором и описание ее работы, не

приведены в тексте диссертации. Аналогичное замечание можно сделать и по материалам четвертой главы. Объем диссертационной 152 стр. Включение в работу Приложения, поясняющего структуру и взаимодействие программ, трудоемкость и время счета, позволило бы исключить эти замечания.

4. В тексте диссертации и библиографии содержатся опечатки, на которые автору указано.

Заключение

Автореферат диссертации дает представление о **содержании, целях исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности результатов** работы. Оппонент согласен с основными выводами работы. Дополнительные комментарии по поводу **научной новизны, направленности работы, достоверности и практической значимости результатов** сделаны оппонентом выше при обсуждении глав диссертации.

По материалам исследований диссертант опубликовал 10 статей. Различные части работы были представлены на ряде Российских и Международных конференций, в том числе на двух Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к диссертациям на соискание степени кандидата наук. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9 «Механика жидкости газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель Абдухакимов Фаррух Адхамович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости газа и плазмы»

Официальный оппонент:

Доктор технических наук,
Начальник отдела «Математическое моделирование и САПР ГТД»
Государственный научный центр Российской Федерации, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Темис Юрий Моисеевич



28.11.2023

подпись

Дата подписания

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 361-64-82, e-mail: [REDACTED]

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Адрес места работы:

111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, Государственный научный центр Российской Федерации, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова

тел.: +7 (495) 361-64-82, e-mail: [REDACTED]

Подпись Темиса Ю.М.

удостоверяю:

Начальник управления по работе с персоналом
ФАУ "ЦИАМ им. П.И. Баранова"



Т.А. Евсюкова

28.11.2023