

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Абдухакимова Фарруха Адхамовича «Новые задачи флаттера авиационных конструкций», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Задачи аэроупругой устойчивости конструкций считаются одними из самых сложных, поэтому любые шаги в развитии методов расчёта, а также в повышении точности и надёжности прогнозов границ флаттера несомненно приближают исследователей к более полному пониманию физики явления флаттера и, что самое ценное, приводят к более успешному решению практических задач снижения вероятности разрушения конструкций.

В работе исследуются три проблемы: флаттер панелей летательных аппаратов, устойчивость к автоколебаниям лопаток компрессорных колёс, флаттер лопастей вертолётот. Для решения этих задач в работе используются различные методы.

Для решения первой задачи панельного флаттера в условиях трансзвукового и малого сверхзвукового обтекания предлагается два подхода:

- 1) Вывод уравнений движения прямоугольной пластины с последующим решением задачи о собственных значениях. Новым является отказ от поршневой теории в определении аэродинамических нагрузок и самостоятельная разработка силового воздействия на колеблющуюся пластину со стороны потока на основе использования теории потенциального течения. С помощью подхода исследованы границы флаттера в зависимости от угла скоса потока.
- 2) Энергетический метод, который заключается в вычислении работы газодинамических сил на перемещениях упругой системы за период колебаний по собственным формам. По знаку работы судят об устойчивости движения системы по данной собственной форме колебаний в потоке газа. Собственные формы колебаний пластины определялись или аналитически, или с помощью комплекса «Abaqus». Газодинамические нагрузки вычислялись с помощью комплекса «Ansys CFX». Новым является использование метода для исследования влияния формы панелей на границы флаттера.

Результаты применения двух подходов хорошо согласуются между собой.

Решение задачи об устойчивости к автоколебаниям лопаток компрессорных колёс в трёхмерной постановке проводилось с применением опробованной В.В. Веденевым и П.В. Макаровым методике, основанной на энергетическом подходе. Перемещения упругой системы определялись методом конечных элементов (программа не указана), газодинамические нагрузки определялись с помощью комплекса «Ansys CFX». Изменение перемещений лопатки в течение периода колебаний передавалось из узлов сетки упругой системы на подвижные узлы газодинамической сетки с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа. Важным обновлением подхода послужило дополнение к расчёту форм колебаний системы «диск-лопатки-

бандажные полки» возможности моделирования бегущей волны деформации, что кардинально должно было улучшить точность определения границ флаттера. Было исследовано влияние отдельных параметров на устойчивость лопаток к флаттеру. Получено сильное влияние величины натяга между бандажными полками и незначительное влияние углов открытия/прикрытия ВНА, величины радиальных зазоров и радиальной неравномерности потока.

Границы флаттера несущей лопасти вертолѐта определялись для двух случаев: с учетом совершаемых лопастью маховых колебаний и без их учета. Модель упругой системы учитывала деформацию лопасти под действием центробежных нагрузок и под действием набегающего потока. Нестационарные газовые силы, действующие на колеблющуюся лопасть, были линеаризованы относительно перемещений и скоростей перемещений. В первом случае задача была сведена к исследованию устойчивости параметрических колебаний, во втором случае границы флаттера определялись из решения задачи на собственные значения для малых колебаний неконсервативных систем. Разработано программное обеспечение, которое позволяет исследовать влияние параметров упругой системы на границы флаттера и давать рекомендации по его подавлению.

Работа разноплановая и интересная. Продемонстрированное в работе владение различными инструментами анализа заставляет относиться к автору как к серьёзному специалисту в области динамической устойчивости упругих авиационных конструкций, обтекаемых потоком жидкости или газа.

Результаты диссертации изложены в 10 работах, из них 5 статей опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus или RSCI.

Достоверность результатов обусловлена как сравнением с решениями задач другими методами и другими авторами, так и сравнением с экспериментальными данными, что очень важно.

Хотелось бы сделать несколько замечаний.

#### **Замечание о постановке задачи о флаттере пластины**

Во-первых, заметим, что панели обшивки ЛА обычно не строго плоские (прямоугольные), а являются участками криволинейных поверхностей, в том числе поверхностей двойной кривизны. Эти отличия формы панели от плоской увеличивает их жесткость, что существенно может влиять на условия возникновения флаттера.

Во-вторых, для указанных скоростей обтекания типично, что скоростной напор соизмерим с абсолютным значением статического давления в набегающем потоке. По этой причине при обтекании панели обшивки ЛА средние значения давлений по обе стороны панели (обозначим их как  $p_1$  и  $p_2$ ) будут как правило существенно различными ( $p_1 \neq p_2$ ), что также выходит за рамки представленной постановки. Вместе с тем используемая постановка  $p_1 = p_2$  наверняка имеет теоретическое, а в некоторых специфических случаях и практическое значение. Пожелание к автору – дать комментарий по поводу практического значения решения задачи флаттера в постановке  $p_1 = p_2$ .

### **Замечание по форме и размеру пластин (стр. 14)**

Непонятно: что в случае каждой из возможных форм панели описывают параметры  $a$  и  $b$ . Какое отношение имеют они к использованным ранее параметрами  $L_x$ ,  $L_y$ ? Также непонятно, чем является  $S$ : истинной площадью панели или условной площадью, рассчитываемой как произведение двух линейных размеров панели. В обоих случаях исследование свойств панелей при условии  $S = \text{const}$  представляется не обоснованным. Такое условие не учитывает, что форма панели влияет на её периметр, и, соответственно, на вес подкрепляющих по периметру силовых элементов. Если известен погонный вес подкрепляющих силовых элементов, то вес панели с учётом веса подкрепляющих элементов будет зависеть не только от площади панели, но и от её периметра, который никак не учитывается. Более правильно предполагать заданным полный поверхностный вес обшивки с учётом веса подкрепляющих элементов. Тогда при параметрических исследованиях влияния формы панели стоило бы выдерживать условие вида  $P/S = \text{const}$ , где  $P$  – периметр панели,  $S$  – площадь панели.

### **Замечание по влиянию формы пластин (стр. 16)**

С учётом замечания «Замечание по форме и размеру пластин (стр. 14)» можно предположить, что установленный автором положительный эффект и соответствующий вывод об увеличении угла скоса панели в форме параллелограмма обусловлен в значительной степени отходом от квадратной формы панели в сторону панели с относительно большим периметром. В реальной конструкции за такой выигрыш в устойчивости к флаттеру придётся заплатить большим весом подкрепляющих панель по её периметру силовых элементов на единицу площади.

При использовании энергетического метода критерием флаттера часто принято считать не просто положительность работы, а положительность работы с учетом рассеивания работы за один период колебания при конструкционном и аэродинамическом демпфировании.

### **Замечания к разделу 3.6**

Полученные с помощью методики результаты достойны внимания с некоторыми уточнениями:

Изменение натяга по полкам влияет не только на формы колебаний, но и на частоты. А изменение частот ведёт к изменению значения числа Струхала, что может повлиять на границу возникновения флаттера.

Изменения углов установки ВНА влияют на углы атаки профилей лопатки. Малые изменения углов атаки действительно слабо влияют на границу устойчивости на расчётных режимах при бесрывном обтекании, однако у границы срыва эти изменения могут быть определяющими в достижении границы флаттера.

### **Вопросы по разделу 4.3**

Из автореферата непонятно, почему при вращении изменяется аэродинамическая сила, полученная из продувок профилей лопасти, что нужно её усреднять?



Как можно с учетом рассчитанного напряженного состояния уменьшать число степеней свободы?

Как можно получить балочную модель эквивалентную трехмерной модели?

Как можно на основе напряженного состояния лопасти создать расчетную модель всей несущей системы вертолета?

Замечания не снижают высокой научной ценности выполненного исследования и обозначают несомненный интерес к работе. На основании содержания автореферата и опубликованных статей можно сделать вывод о том, что диссертационная работа «Новые задачи флаттера авиационных конструкций» представляет собой завершенное самостоятельное исследование и соответствует специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация отвечает требованиям пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор Абдухакимов Фаррух Адхамович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Ножницкий Юрий Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заместитель генерального директора –  
директор исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность»  
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник



Ножницкий Юрий Александрович  
4 декабря 2023г.

Ножницкий Юрий Александрович – доктор технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые двигатели летательных аппаратов», старший научный сотрудник, Заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность».  
Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»  
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Контактные данные:

Тел. +7 (495) 362-39-32; электронная почта: [REDACTED]