

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание учёной 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**

Флаттер и сопутствующие ему проблемы возникали в большинстве случаев на сверхзвуковых режимах полёта различных летательных аппаратов, начиная со Второй мировой войны и до наших дней. Широко известен и достаточно хорошо изучен связанный флаттер, который наступает при взаимодействии двух собственных мод колебаний. Другой вид флаттера — одномодовый — достаточно долго не рассматривался как существенный, хотя и наблюдался в ряде экспериментов. Он возникает при малой сверхзвуковой скорости, где большинство традиционных упрощённых аэродинамических теорий не применимы, поэтому необходимо использовать более общие модели. В литературе присутствуют работы по данному направлению, но они не охватывают весь спектр параметров, способных оказать влияние на границу устойчивости. Проведение таких исследований является **актуальным**, а полученные в диссертационной работе новые результаты представляют научный и практический интерес.

Исследования флаттера лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и лопастей несущей системы вертолётá представляют большой **практический** интерес, поскольку они способствуют совершенствованию конструкций летательных аппаратов и повышению безопасности их полётов. Наличие эффективного инструмента, позволяющего на этапе проектирования спрогнозировать наступление флаттера, а также быстро оценить и проанализировать влияние различных влияющих на него аэродинамических и конструктивных факторов, положительно скажется на развитии отечественного самолётó- и вертолётóстроения. Совершенствование разработанной ранее методики численного расчёта флаттера и её апробация

на реальных промышленных задачах обуславливают **актуальность** данного направления диссертационной работы.

Научная новизна диссертации заключается в новых результатах, полученных при исследовании влияния угла скольжения и различных геометрических параметров пластины на границу флаттера при малых сверхзвуковых скоростях; развитии разработанной ранее методики численного расчёта флаттера и её применении для анализа устойчивости лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, а также лопастей несущих винтов пассажирского вертолётa с учётом их упругого взаимодействия.

Структура диссертации включает в себя введение, четыре главы с основными выводами по каждой из них, заключение, список литературы из 171 источника и одно приложение.

Во введении описывается актуальность исследований по трём направлениям: флаттер пластин (панелей), флаттер лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и флаттер лопастей несущей системы вертолётa; формулируются цели и задачи диссертационной работы, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе в линейной постановке исследуется аэроупругая устойчивость бесконечной серии тонких прямоугольных пластин, шарнирно опёртых по всем кромкам, которые обтекаются потоком невязкого совершенного газа при малых сверхзвуковых скоростях. Акцент ставится на изучении явления одномодового флаттера при ненулевом угле скольжения. Постановка задачи основана на теории потенциального течения газа и теории тонких пластин Киргоффа – Лява. Решение уравнений относительно возмущения потенциала скорости ищется с помощью преобразования Лапласа. На его основе выводится распределение возмущения давления, которое подставляется в уравнения движения пластины. В результате получается интегро-дифференциальная задача на собственные значения, которая решается методом Бубнова – Галёркина. Далее в главе приводится

исследование сходимости численного решения в зависимости от числа базисных мод, выполняется анализ влияния геометрических размеров пластины и угла скольжения на границу флаттера. В завершении формулируются основные результаты и выводы.

Вторая глава продолжает начатое направление. В ней с помощью энергетического метода изучается устойчивость шарнирно-опёртых пластин конечных размеров в форме прямоугольника, трапеции и параллелограмма. В начале главы приводится вывод уравнения изменения энергии для общего случая линейно упругого тела и для тонкой пластины, затем даётся описание методики расчёта. В её основе лежит допущение о малости влияния потока воздуха на собственные формы колебаний конструкции. В результате задача разделяется на две независимые: упругую и аэродинамическую. В ходе решения первой из них определяются собственные частоты и формы колебаний конструкции. Впоследствии они используются в нестационарном аэродинамическом расчёте для задания перемещений соответствующей границы расчётной области. Критерий устойчивости основан на вычислении работы, совершаемой давлением газа на последнем периоде установившихся гармонических колебаний. В главе приводятся результаты расчёта границы одномодового флаттера для пластин различной формы (прямоугольник, трапеция и параллелограмм) и сравниваются полученные результаты. В завершении формулируются основные выводы.

В третьей главе энергетический метод применяется для исследования флаттера лопаток рабочего колеса компрессора двухвального газотурбинного двигателя. Вначале приводится обзор литературы по данному направлению, затем излагаются математическая постановка задачи и методика расчёта. Оставшаяся часть главы посвящена описанию и анализу полученных результатов. Автором диссертационной работы проведено детальное исследование влияния конструктивных и аэродинамических параметров на границу флаттера лопатки рабочего колеса компрессора: изучено влияние

радиального зазора между торцом лопатки и корпусом компрессора, угла прикрытия и открытия входного направляющего аппарата, радиальной неравномерности потока на входе в двигатель, а также величины монтажного натяга в бандажных полках. Исследования проводились на двух режимах, соответствующих испытаниям двигателя в термобарокамере. Полученные численные и экспериментальные результаты сравниваются между собой, и демонстрируют совпадение на качественном уровне (наличие или отсутствие флаттера на заданном режиме работы). В последнем разделе главы формулируются основные выводы по данному направлению.

Четвёртая глава посвящена устойчивости лопасти несущего винта пассажирского вертолётa. В её первом разделе приводится обзор литературы по данному направлению. Затем описывается методика расчёта, которая основана на использовании метода конечных элементов. На первом этапе решается задача статической аэроупругости, из которой в трёхмерной постановке определяется усреднённое напряжённо-деформированное состояние лопасти с учётом геометрической нелинейности, действия центробежной и усреднённой за период вращения аэродинамической сил. Затем проводится уменьшение степеней свободы конечно-элементной модели с помощью использования техники суперэлементов, и создаётся модель всей несущей системы вертолётa с учётом рассчитанного статического состояния лопастей. С помощью такого подхода проводится исследование устойчивости с учётом совершаемых лопастью маховых колебаний и без их учёта. В первом случае решается серия задач о развитии малого возмущения лопасти за один период вращения и составляется матрица монодромии. Критерием устойчивости является наличие хотя бы одного мультипликатора Флоке, лежащего вне единичного круга. Анализ флаттера без учёта маховых колебаний проводится в предположении статического напряжённо-деформированного состояния лопасти и стационарного состояния потока воздуха. Аэродинамические силы

линеаризуются, зависимость от времени принимается в форме экспоненты и в последствии решается задача на определение комплексных собственных значений. В завершающей части главы приводятся результаты численных расчётов, полученные для четырёх режимов: трёх видов горизонтального полёта с разными характеристиками и режим висения. На основе полученных данных определяются параметры, при которых возникает неустойчивость лопастей несущей системы или наблюдается их устойчивость, приводятся рекомендации по подавлению флаттера. В последнем разделе главы кратко излагаются основные результаты и выводы.

Заключение содержит основные выводы по всей диссертации.

Достоверность результатов работы, полученных с помощью разработанных автором численных алгоритмов, подтверждена сравнением границ устойчивости пластины с представленными в литературе данными и анализом сходимости решения в зависимости от числа базисных мод. Достоверность расчётов, выполненных в коммерческом программном обеспечении ANSYS CFX и ANSYS Mechanical APDL, обеспечена исследованием сходимости решения каждого класса задач (аэродинамика, собственные колебания) по временному шагу и пространственным сеткам. Корректность решения, полученного для некоторых примеров, подтверждена сравнением с экспериментальными данными.

Публикации и апробация результатов. По теме диссертации опубликовано пять статей в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus или RSCI, а также достаточное количество материалов и тезисов конференций различного уровня. Сильной стороной работы является наличие у диссертанта публикации в журнале «AIAA Journal», который в системе цитирования SCOPUS входит в первый квартиль по показателю SJR в категории «Aerospace Engineering».

К диссертационной работе имеются следующие **замечания и вопросы:**

1. Обзор литературы не раскрывает должным образом направление исследований, результаты которого представлены в первых двух разделах. Явление связанного флаттера затрагивается поверхностно, хотя ему следовало бы уделить больше внимания. Автор приводит ссылки на работы, где рассматриваются нелинейные задачи или учитывается пограничный слой, но ограничивается лишь их перечислением без малейшего описания полученных результатов и сформулированных на их основе выводов.

2. При упоминании поршневой теории не приводится ссылка на работу Ильюшина А.А. (Ильюшин А. А., 1956). Изложенный в ней материал докладывался на заседании учёного совета Института механики МГУ 20 марта 1947 года и был опубликован без изменений. Фактически это означает, что основы поршневой теории были изложены задолго до общеизвестной в зарубежной литературе работы Джеймса Лайтхилла (Lighthill M. J., 1953), которая также не упоминается в диссертации.

3. При решении задач аэроупругой устойчивости в линейной постановке традиционно строятся зависимости действительных и мнимых частей комплексных собственных значений от параметра, характеризующего скорость набегающего потока газа (Sander G. et al., 1973; Lin Kuo-Jiun et al., 1989; Chai Y. et al., 2021). Такое представление позволяет не только наглядно проиллюстрировать наступление флаттера, но и определить его тип. Почему в диссертационной работе отсутствуют такие зависимости? Их получение не является ресурсоёмкой задачей.

4. В разделе 1.7.1 обсуждается изменение границ одномодового и связанного флаттера от размера пластины L_y (Рис. 1.10–1.12). Что происходит при слиянии областей А и В? Можно ли отдельно выделить эти два вида флаттера? Они возникают одновременно, но по разным модам?

5. В разделе 2.2 при описании энергетического метода полагается, что *«влияние потока воздуха на собственные колебания конструкции незначительно»*. При взаимодействии тонких или податливых панелей с

набегающим потоком газа возможно возникновение колебаний большой амплитуды с существенным искажением формы конструкции. Каковы границы применения используемого допущения?

6. Анализ устойчивости в разделах 2 и 3 основан на вычислении работы нестационарного давления газа за один период колебаний. При этом решается задача аэродинамики, где часть границы движется по собственной форме колебаний конструкции в вакууме. Фактически, упругая составляющая отсутствует полностью. Корректно ли здесь говорить о флаттере и аэроупругости в целом? Когда можно использовать такой подход?

7. В уравнениях (2.29) и (3.6) параметр A определяет амплитуду движения границы по заданной собственной форме колебаний конструкции в вакууме. Варьируя его величину, можно повлиять на работу давления газа, которая вычисляется по выражению (3.7) в ходе решения задачи аэродинамики. Получается, что критерий устойчивости зависит от параметра, выбор которого произволен. На основании чего подбирается величина A ? Как от неё зависит работа?

8. В разделе 3.4 сказано: *«Расчет собственных частот и форм лопаток проведен с учетом центробежных и температурных нагрузок, а также геометрической нелинейности»*. В диссертации отсутствует соответствующая математическая постановка задачи, что затрудняет трактовку полученных результатов с точки зрения механики. Необходимо её привести вместе с граничными условиями и дать ответы на следующие вопросы:

8.1. Каким образом учитывается нелинейность в задаче о собственных колебаниях? Какие слагаемые удерживаются в процессе линеаризации?

8.2. Куда входят центробежные силы и температурная нагрузка?

8.3. Как учитывается монтажный натяг в задаче о собственных колебаниях?

9. В тексте диссертации присутствуют орфографические ошибки, опечатки, несоответствие обозначений. Файл с их указанием прилагается.

Автореферат правильно и полно отражает всё содержание диссертации.

Указанные замечания и вопросы не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости газа и плазмы (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова. Диссертационная работа оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Считаю, что диссертация «Новые задачи флаттера авиационных конструкций» является законченной научно-квалификационной работой, а соискатель, Абдухакимов Фаррух Адхамович, заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости газа и плазмы.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией механики функциональных материалов,
«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского Федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Лекомцев Сергей Владимирович


(подпись)

/ С. В. Лекомцев /
(расшифровка подписи)

06.12.2023 г.

Контактные данные:

телефон: +7 (342) 237-83-99, e-mail: [REDACTED]

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Адрес места работы:

614013, Пермский край, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д.1,

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской
академии наук» — филиал Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Пермского Федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория механики
функциональных материалов.

Телефон: +7 (342) 237-83-99, e-mail: [REDACTED]

Подпись сотрудника С.В. Лекомцева удостоверяю:

Учёный секретарь «ИМСС УрО РАН»
к.ф.-м.н. доцент



Н. А. Юрлова /
(расшифровка подписи)

06.12.2023 г.