

# Развитие современных методов исследования задач аэроупругости летательных аппаратов

Веденеев В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Явление флаттера, то есть динамической неустойчивости упругой конструкции в потоке воздуха, встречается в различных аэроупругих системах. Наиболее известный вид флаттера — флаттер крыла самолёта, экспериментально обнаруженный и теоретически изученный в начале XX века. С развитием авиации флаттер возникал и до сих пор возникает и в других элементах летательных аппаратов, где он исследован менее детально в силу сложностей как математических постановок задач, так и экспериментальных исследований.

В докладе проводится обзор работ коллектива НИИ механики МГУ, выполненных под руководством автора, в области флаттера панелей обшивки летательных аппаратов, флаттера рулей и корпусов сверхзвуковых БПЛА, флаттера лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, флаттера воздушного винта и флаттера лопастей винта вертолета.

## 1 Панельный флаттер

Флаттер панелей обшивки возник на первых сверхзвуковых летательных аппаратах — немецких ракетах V-2. Этой задаче посвящена масса работ [1, 2, 3, 4], в которых предполагалось течение с большой сверхзвуковой скоростью, что позволяло использовать поршневую теорию для описания нестационарного поля давления. Гораздо позже было теоретически открыт и экспериментально подтверждён [5] другой вид панельного флаттера — одномодовый флаттер — который возникает при малых сверхзвуковых скоростях, где поршневая теория неприменима.

В докладе обсуждаются границы области флаттера прямоугольных и искривлённых панелей, рассчитанные в рамках линейной теории; развитие нелинейных флаттерных колебаний и возможные конфигурации предельных циклов; исследование влияния пограничного слоя на поверхности панели на её аэроупругую устойчивость; развитие флаттера при переходных режимах полёта и возможность управления предельными циклами колебаний [6, 7, 8, 9].

## 2 Флаттер корпуса и оперения БПЛА

Флаттер беспилотных летательных аппаратов при больших сверхзвуковых скоростях является одной из малоизученных проблем, стоящих перед их разработчиками. Современные методы расчета аэроупругой устойчивости либо позволяют решать упрощенные варианты реальных задач (например, без учета физико-химических явлений и реальной геометрии внешних обводов), либо требуют большой вычислительной мощности. Была разработана методика расчета флаттера летательного аппарата с использованием стандартного инженерного программного обеспечения и дополнительных разработанных программных модулей. Дано обоснование необходимости уточнения существующих методик расчета аэроупругости летательных аппаратов с учетом реальной геометрии конструкции и с возможностью учета физико-химических процессов, происходящих в воздухе при движении тел с большой скоростью. Разработаны теоретические положения расчета аэроупругой устойчивости с учетом этих факторов и приведены три примера расчета аэроупругой устойчивости модельных объектов, в том числе корпусных и рулевых форм флаттера, валидированных экспериментальными данными [10].

### 3 Флаттер лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и энергетических установок

Флаттер лопаток является одной из основных проблем, стоящей перед конструкторами современных высоконапорных компрессоров авиационных двигателей и газовых турбин. Как правило, для прогнозирования и отстройки флаттера в практике российского авиадвигателестроения используется статистический метод [11], основанный на эмпирических данных многочисленных ранее проведенных испытаний. Однако, для современных лопаток новых типов результаты не могут быть достоверно предсказаны этим методом. В цикле работ [12, 13, 14] на основе энергетического метода разработана методика и программное обеспечение для расчёта флаттера лопаток, валидированная на 7 различных объектах, по которым есть экспериментальные данные испытаний на флаттер. В частности, впервые в российском авиадвигателестроении проведена отстройка от флаттера лопатки 1 ступени компрессора низкого давления на основе анализа зон подвода энергии к лопатке, полученных численным моделированием без промежуточных испытаний.

### 4 Флаттер лопастей винта вертолѐта и воздушного винта

Флаттер лопастей должен быть исключѐн на всех режимах работы винта вертолѐта и воздушного винта [15, 16]. В отечественном вертолетостроении применяются различные расчетные методы для исследования флаттера лопастей. При этом для одних методов необходимо уточнение используемых аэродинамических моделей, основанных на теории вихревой линии и требующих предварительных экспериментальных данных, а для других — усложнения упругих моделей, основанных на двухступенной модели лопасти, неприменимой к современным гибким лопастям. Описывается разработанная методика расчёта, математическая модель и программное обеспечение, учитывающие нестационарность обтекания лопастей, возможность возникновения флаттера по высшим модам, влияние упругого взаимодействия лопастей через систему тяг и валов [17].

### Список литературы

- [1] Григолюк Э.И., Лампер Р.Е., Шандаров Л.Г. Флаттер панелей и оболочек// Итоги науки. Механика. 1963. М.: ВИНТИ, 1965. С. 34-90.
- [2] Dowell E.H. Aeroelasticity of plates and shells. Kluwer Academic Pub., 1974. 160 p.
- [3] Новичков Ю.Н. Флаттер пластин и оболочек// Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела. Т. 11. М.: ВИНТИ, 1978. С. 67-122.
- [4] Алгазин С.Д., Кийко И.А. Флаттер пластин и оболочек. М.: Наука, 2006. 247 с.
- [5] Vasily V. Vedeneev, Sergey V. Guvernyuk, Alexander F. Zubkov, Mikhail E. Kolotnikov. Experimental observation of single mode panel flutter in supersonic gas flow// Journal of fluids and structures. 2010. Vol. 26. P. 764-779.
- [6] Anastasia Shishaeva, Vasily Vedeneev, Andrey Aksenov, Gennady Sushko. Transonic Panel Flutter in Accelerating or Decelerating Flow Conditions// AIAA Journal. 2018. Vol. 56. № 6. P. 997-1010.
- [7] Vsevolod Bondarev, Vasily Vedeneev. Influence of the viscous boundary layer perturbations on single-mode panel flutter at finite Reynolds numbers// Journal of fluid mechanics. 2018. Vol. 852. P. 578-601.
- [8] Anastasia Shishaeva, Andrey Aksenov, Vasily Vedeneev. The effect of external perturbations on nonlinear panel flutter at low supersonic speed// Journal of fluid and structures. 2022. Vol. 111. 103570.
- [9] F. A. Abdukhakimov, V. V. Vedeneev. Effect of yaw angle on flutter of rectangular plates at low supersonic speeds// AIAA Journal. 2022. Vol. 60. No. 7. P. 4256-4266.
- [10] Ф. А. Абдухакимов, А. В. Быков, В. В. Веденеев, Л. Р. Гареев, В. А. Нестеров. Исследование аэроупругих явлений корпуса и тонкостенных конструкций беспилотных ЛА при больших сверхзвуковых скоростях// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 4. С. 70-80.

- [11] Хориков А.А. Прогнозирование и диагностика флаттера лопаток осевых компрессоров авиационных ГТД. М.: ЦИАМ, Труды №1311. 2002. 352 с.
- [12] Vasily V. Vedeneev, Mikhail Kolotnikov, Pavel Makarov. Experimental validation of numerical blade flutter prediction// Journal of propulsion and power. 2015. Vol. 31. No. 5. P. 1281-1291.
- [13] Ф. А. Абдухакимов, В. В. Веденеев, М. Е. Колотников, П. В. Макаров. Численное исследование влияния конструктивных параметров на прогнозирование флаттера лопаток// Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2019. № 2. С. 17-26.
- [14] Макаров П.В., Колотников М.Е., Веденеев В.В., Абдухакимов Ф.А. Комплексный анализ динамического поведения лопаток компрессора на этапе проектирования// Авиационные двигатели. № 3 (20), 2023. С. 49-66.
- [15] Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродно Л.Н., Лейканд М.А. Расчет и проектирование. Том 2. М.: Машиностроение. 1967. 424 с.
- [16] Peretz P. Friedmann, Rotary-Wing Aeroelasticity: Current Status and Future Trends// AIAA Journal. 2010. V. 42(10). P. 1953-1972.
- [17] Abduhakimov F., Bondarev V., Dadunashvili S., Konovalov A., Vedeneev V. Advanced coupled aeroelastic analysis of helicopter rotor system // 45th European Rotorcraft Forum 2019 (ERF). 2019. V. 2. P. 787-800.