<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68>

УДК 629.7.015.4:533.6.013.43:629.7.03

Опыт применения в аэродинамической трубе динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов

А. Н. Корякин

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский Московской области, Российская Федерация

Излагается метод безопасного проведения испытаний моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе с установкой внутри модели нелинейного динамического успокоителя колебаний. Нелинейность успокоителя колебаний определяется использованием упругого элемента в виде пакета тонких плоских пружин. Представлены действующие конструкции нелинейных динамических успокоителей и результаты применения. Показано положительное влияние повышения диссипативных свойств упругого крепления модели в рабочей части аэродинамической трубы на расширение диапазона допустимых углов атаки в эксперименте.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, модель летательного аппарата, динамический успокоитель колебаний, динамическая устойчивость, безопасность эксперимента

Для цитирования: Корякин А. Н. Опыт применения в аэродинамической трубе динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 62–68. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68>

For citation: Koryakin A. N. Application of a dynamic vibration damper in aircraft models tested in a wind tunnel // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 4. P. 62–68. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68>

Поступила 23.10.2020 Отрецензирована 18.11.2020 Одобрена 18.11.2020 Опубликована 30.12.2020

Введение

В аэродинамических трубах (АДТ) основной объем испытаний моделей летательных аппаратов (ЛА) проводится с целью определения действующих на них аэродинамических сил и моментов. Обычно модель устанавливается на механизме изменения угла атаки α с использованием хвостовой державки (рис. 1). Между моделью и державкой располагаются тензометрические весы, служащие для измерения нагрузок. При проведении экспериментов с трансзвуковыми скоростями потока серьезной проблемой является внезапное возникновение колебаний модели, величина которых, как правило, стремительно увеличивается. Предотвратить аварию в такой ситуации

можно только экстренным прекращением эксперимента.

В ведущей аэродинамической трубе Евросоюза ETW в качестве средств борьбы с данным явлением используются стационарные активные (управляемые средствами автоматики) антивибрационные системы.

В трансзвуковой промышленной трубе Т-128 ЦАГИ с этой целью применяются пассивные динамические успокоители колебаний, размещаемые внутри моделей (рис. 1).

Причины внезапных интенсивных колебаний моделей ЛА и возможности применяемых способов борьбы с ними

На рисунке 1 вектором Y изображена перпендикулярная к потоку воздуха составляющая суммарной силы, действующей на модель ЛА. Данную составляющую можно разбить

Рис. 1. Установка модели ЛА в рабочей части АДТ

Рис. 2. Иллюстрация влияния динамического успокоителя на колебания модели ЛА в потоке воздуха

на две силы: $Y = Y_s + Y_d$, где Y_s – статическая сила, Y_d – динамическая сила. На рисунке 2 красным цветом изображены зависимости Y_s и Y_d от угла атаки α модели без динамического успокоителя. Зависимости показывают,

что с увеличением угла α происходит закономерный рост силы Y_s до значений $Y_s = \max$ и стремительный рост размаха колебаний силы Y_d при близком приближении к значениям $Y_s = \max$. Размахи колебаний силы Y_d

и размахи колебаний модели взаимосвязаны, их неограниченный рост неминуемо заканчивается аварией.

Данное явление вызывается потерей динамической устойчивости системы «модель – хвостовая державка» под воздействием обтекания потоком воздуха при больших углах α . Впервые его объяснил Дж. П. Ден-Гартог, анализируя раскачивание («галопирование» – термин) линий электропередач при ветре [1]. Он показал, что провода раскачиваются, если производная силы Y по углу α отрицательна, и ввел следующий критерий динамической устойчивости:

$$\frac{dY}{d\alpha} < 0 - \text{неустойчивость}, \frac{dY}{d\alpha} > 0 - \text{устойчивость}$$

(предполагается, что внутреннее трение в конструкции отсутствует).

В работе [2] показано, что с увеличением угла α в потоке воздуха потеря динамической устойчивости упругой системы наступает раньше, чем $\frac{dY}{d\alpha}$ достигнет отрицательных значений. При малых, но еще положительных значениях $\frac{dY}{d\alpha}$ начинается интенсивный рост производной подъемной силы по скорости изменения угла атаки (производной $\frac{dY}{d\dot{\alpha}}$), это

ускоряет начало динамической неустойчивости системы «модель – хвостовая державка».

Использование динамических успокоителей колебаний в АДТ-128 (рис. 2 – зеленые линии), как правило, позволяет преодолеть рассмотренный недостаток аэродинамических экспериментов с моделями ЛА на хвостовой державке. Конкретные результаты экспериментов далее будут показаны.

Нелинейные динамические успокоители колебаний

Динамический успокоитель колебаний (ДУК) преобразует исходную, практически лишенную внутреннего трения динамическую систему «модель – хвостовая державка» в новую систему с внутренним трением «модель – ДУК – хвостовая державка». ДУК, ранее широко применяемые в АДТ-128 ([2],

авторы Гоздек В.С., Корякин А.Н., ЦАГИ), названы линейными, поскольку по характеристикам близки к линейным устройствам. Схема такого устройства изображена на рисунке 3. Обязательными составными частями здесь являются подвижная масса, упругий элемент, демпфер и основание. Действие на модель динамической нагрузки приводит к колебаниям подвижной массы успокоителя в линейном y и угловом φ направлениях, что, в свою очередь, вызывает колебания штока демпфера и поглощение демпфером энергии колебаний модели.

Анализ устойчивости движения динамической системы «модель – ДУК – хвостовая державка» в линейной постановке сводится к определению соответствия ее требованиям критерия Рауса – Гурвица. Расчетным путем установлено, что введение в систему «модель – хвостовая державка» дополнительного внутреннего трения за счет использования ДУК позволяет, при определенных параметрах ДУК, обеспечить достаточный запас динамической устойчивости [2]. Практика подтвердила теоретические прогнозы, и поэтому ДУК прочно закрепились в АДТ-128 в качестве средства борьбы с опасными колебаниями моделей ЛА. Конструкция их постепенно совершенствовалась в направлении повышения эффективности с одновременным уменьшением габаритов.

Рис. 3. Линейный ДУК модели ЛА в потоке воздуха

Рис. 4. Нелинейный ДУК модели ЛА в потоке воздуха

В результате произошел переход к использованию ДУК с нелинейными параметрами (нелинейных ДУК, [3]). Схематически это устройство показано на рисунке 4.

В основании нелинейного ДУК консолю зажат упругий элемент, выполненный в виде пакета тонких плоских пружин. Пакет касается скользящих опор внутри подвижной массы поверхностями крайних пружин и соединен с ней за среднюю пружину. При движении подвижной массы происходит изгиб плоских пружин и их относительное

смещение с трением друг о друга и о подвижную массу. Работа сил трения, происходящая в процессе смещения пружин пакета, приводит к преобразованию энергии колебаний модели в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающем пространстве. Преимуществом используемого здесь упругого элемента является компактность с одновременной реализацией высоких показателей гибкости, прочности и диссипативных свойств. Для проектирования нелинейных успокоителей разработаны инженерная методика и программы расчета. Инженерная методика расчета изложена в работе [4]. Нелинейные ДУК обеспечили возможность надежного получения стационарных аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ-128 при больших углах атаки и скольжения и являются в настоящее время основой безопасности такого эксперимента. На рисунке 5 изображен чертеж успешно функционирующего на протяжении более чем десятка лет варианта конструкции такого успокоителя для модели истребителя.

Графики на рисунке 6 демонстрируют диссипативные свойства системы «модель – ДУК – хвостовая державка» с названным устройством. Представлены результаты воздействия на модель скачка в изменении

Рис. 5. Установка нелинейного ДУК в носовой части модели истребителя

Рис. 6. Изменение динамической нагрузки на модель истребителя при свободных колебаниях на хвостовой державке без потока воздуха: а) без ДУК, б) с нелинейным ДУК

Рис. 7. Фото отдельного варианта ДУК, действующего в двух плоскостях движения

вертикально действующей силы Y без ДУК (рис. 6а) и с ДУК внутри модели (рис. 6б).

Скачок создавался путем изгиба системы домкратом с точкой приложения усилия примерно в центре масс модели. Домкрат заканчивался принудительно «ломающимся» наконечником. Производилась регистрация изменений компонента Y тензометрических весов штатной измерительной аппаратурой АДТ-128 после «перелома» наконечника домкрата и возникновения колебаний модели. Результаты измерений показали, что установка ДУК обеспечила примерно десятикратное увеличение логарифмического декремента колебаний δ .

Разработаны конструкции ДУК, которые могут предотвращать опасные колебания как в вертикальной, так и горизонтальной плоскости движения. С этой целью его упругое звено выполняется из двух пакетов тонких плоских пружин с ортогонально ориентированными поверхностями (рис. 7).

Подвижные массы ДУК обычно выполняются из тяжелого сплава на основе вольфрама, но, при наличии возможностей, могут быть и свинцовыми.

Все представленные ДУК сконструированы, подготовлены к экспериментам в АДТ-128 и настраивались в процессе испытаний автором данной работы.

Графики на рисунке 8 отражают возможности ДУК по обеспечению безопасного определения характеристик моделей ЛА в АДТ-128 согласно всем требованиям рабочей программы эксперимента и в необходимом диапазоне измеряемых параметров, включающем величины производных $C_y^a \leq 0$.

Успешная эксплуатация ДУК в АДТ-128 подтвердила положения работы [2] о пользе обоснованного использования внутреннего трения в узлах подвески аэродинамической модели с целью обеспечения ее динамической устойчивости в потоке воздуха. В работе было предложено крепить хвостовую державку к стойке механизма α не жестко, а на двух шарнирах. Причем ближний к модели шарнир установлен на стойке неподвижно, а крайний закреплен на упругом звене с демпфером. На рисунке 9 изображен вариант такого решения. Поворот модели по углу α сопровождается неминуемым поворотом

Рис. 8. Экспериментальные возможности АДТ-128 с динамическими успокоителями колебаний моделей:
а) эксперименты при различных числах M , б) эксперименты по исследованию аэродинамического гистерезиса
— $M = 0,25$, — $M = 0,50$, — $M = 0,75$, — $M = 0,199$, — $M = 0,249$

Рис. 9. Крепление хвостовой державки к стойке механизма α при помощи упругого звена и демпфера

хвостовой державки на ближнем к модели шарнире с линейной деформацией упругого звена и смещением штока демпфера на ее конце. В результате энергия колебаний модели, как и в динамическом успокоителе, преобразуется в демпфере в тепловую энергию и рассеивается в окружающем пространстве. Расчеты показали [2], что некоторое уменьшение нижней частоты колебаний модели при этом соизмеримо с привычным уменьшением ее

в реальном эксперименте за счет установки динамического успокоителя.

Заключение

Многолетний опыт стабильной и успешной эксплуатации динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе Т-128 показал, что повышение диссипативных характеристик динамической системы из державки и модели оказалось

правильным решением. В перспективе существует возможность исключить обязательное использование динамических успокоителей, придав стационарной подвеске моделей необходимые диссипативные свойства.

Список литературы

1. Ден.-Гартог Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.
2. Корякин А. Н. Исследование динамики моделей на тензометрических весах

в аэродинамической трубе // Тр. ЦАГИ. 1993. Вып. 2513. 42 с.

3. Патент РФ 2375691 М. Кл.³ G01M 9/04 Динамический успокоитель колебаний аэродинамической модели / Быковский А. В., Корякин А. Н., Стрелков К. С.; заявл. 06.06.2008, опубл. 10.12.2009 Бюл. № 34.

4. Корякин А. Н. Нелинейный динамический успокоитель колебаний модели с упругим звеном из пакета тонких плоских пружин // Тр. ЦАГИ. 2009. Вып. 2683. С. 232–237.

Об авторе

Корякин Александр Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: летательные аппараты, прочность и аэроупругость, теория колебаний.

Application of a dynamic vibration damper in aircraft models tested in a wind tunnel

Koryakin A. N.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

This paper presents a method for safe testing of aircraft models equipped with a nonlinear dynamic vibration damper in a wind tunnel. The nonlinearity of the tested vibration damper is provided by an elastic element consisting in a package of thin flat springs. Nonlinear dynamic dampers of various designs are presented, along with the results of their application. It is experimentally shown that improved dissipative properties of the proposed elastic fastening of the model under test to the wind tunnel surface have a positive effect on the expansion of the range of admissible attack angles.

Keywords: wind tunnel, aircraft model, dynamic vibration damper, dynamic stability, experiment safety

Information about the author

Koryakin Alexander N. – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.

Research interests: aircraft, strength, aeroelasticity, vibration theory.