

УДК 629.7.018.4

doi: 10.53816/20753608\_2025\_3\_84

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

### AN AERODYNAMIC WAY OF LOADING AN AIRCRAFT WITH RANDOM VIBRATION ON THE GROUND

*По представлению чл.-корр. РАРАН Е.А. Хмельникова*

**В.В. Засухин, А.А. Козлов**

*РФЯЦ — ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина*

**V.V. Zasukhin, A.A. Kozlov**

В статье рассматривается аэродинамический способ испытаний летательного аппарата на стенде, работающем по принципу аэродинамической трубы кратковременного действия с открытой рабочей частью. Испытания проводились с целью исследования возможности проведения нагружений летательного аппарата, прогнозирования и уточнения расчетных вибрационных нагрузок. В статье приведены схема испытаний, основные результаты, решенные задачи.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, электродинамический вибростенд, широкополосная случайная вибрация, спектральный состав ускорения, среднее квадратическое значение ускорения.

The article discusses the aerodynamic method of testing an aircraft on a stand operating on the principle of a short-term wind tunnel with an open working part. The tests were aimed at studying the possibility of loading the testing object, predicting and refining the calculated vibration loads. The article presents a test scheme, the main results, and solved problems.

**Keywords:** aircraft, electrodynamic vibration stand, broadband random vibration, spectral composition of acceleration, RMS acceleration level.

Механические конструкции, представляющие собой тела вращения, с длиной в диапазоне от двух до нескольких метров являются одной из разновидностей форм летательного аппарата (ЛА), находят широкое применение в различных областях авиационной и ракетно-космической техники [1–3]. При эксплуатации (транспортирование изделия носителем на подвеске к месту его применения или полет по траектории после отделения от носителя) такие конструкции подвергаются длительному силовому воздействию окружающей среды, в том числе воздействию пульсаций давления набегающего по-

тока воздуха, в результате чего имеет место его вибронагружение с широким спектром частот от десятков герц до десятков килогерц [4], с различными уровнями распределения ускорения по длине ЛА, с нелинейным увеличением уровня ускорения от кончика к хвостовой части и с различным спектральным составом среднего квадратического значения (СКЗ) ускорения в разных частях корпуса ЛА. Обычно испытания ЛА проводятся на электродинамических вибрационных стендах [5], позволяющих воспроизводить широкополосную случайную вибрацию. При этом, во-первых, ЛА жестко закрепляется

на столе вибростенда с использованием оснастки, что не соответствует граничным условиям при совместном полете с носителем и на траектории; во-вторых, вибрационное нагружение осуществляется кинематическим способом, что не соответствует натурному аэродинамическому нагружению, распределенному по поверхности корпуса ЛА.

С целью соответствия граничных условий лабораторные испытания надо проводить без присоединенной оснастки. Для этого наиболее подходит метод аэродинамического возбуждения [6, 7] при помощи имеющегося в РФЯЦ — ВНИИТФ стенда ВПАД (вибрационный пневмоаэродинамический), принцип действия которого заключается в способности создавать высокоскоростной турбулентный поток воздуха, который нагружает вибрацией конструкцию ЛА, в результате взаимодействия потока с корпусом. На стенде ВПАД были проведены испытания ЛА с целью исследования возможности проведения нагружений летательного аппарата, прогнозирования и уточнения расчетных вибрационных нагрузок. На рис. 1 представлен стенд ВПАД, на рис. 2 схема нагружений ЛА.

На рис. 2 показан ресивер, в который накачивается сжатый воздух. Впоследствии воздух, проходя через сопло Лавала [8], воздействует на ЛА, в результате взаимодействия воздушной струи с упругими элементами корпуса возникает вибрационное нагружение ЛА. Характер вибрационного нагружения ЛА определяется его динамическими характеристиками и характеристиками газовой (воздушной) струи [9].

Задачами вибрационных испытаний являлись: определение параметров воздушного потока (числа Маха, скоростного напора), давления в ресивере и распределителе стенда при обдуве ЛА; определение уровней вибрационных нагрузок при различных значениях скоростного потока.

Для определения параметров воздушного потока перед ЛА была размещена трубка Пито. Проводилось кратковременное нагружение ЛА со временем не более 10 с, при поддержании на выходе распределителя постоянного давления  $P_{\text{вых}}$ .

В таблице приведены значения параметров работы стенда ВПАД и характеристики воздушной струи. На рис. 3 для опыта № 1 приведены спектральный состав ускорения ( $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ) в

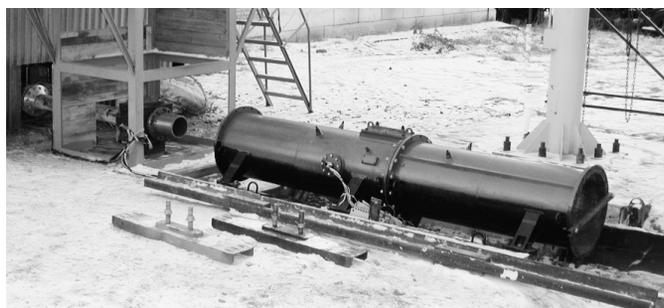


Рис. 1. Стенд ВПАД

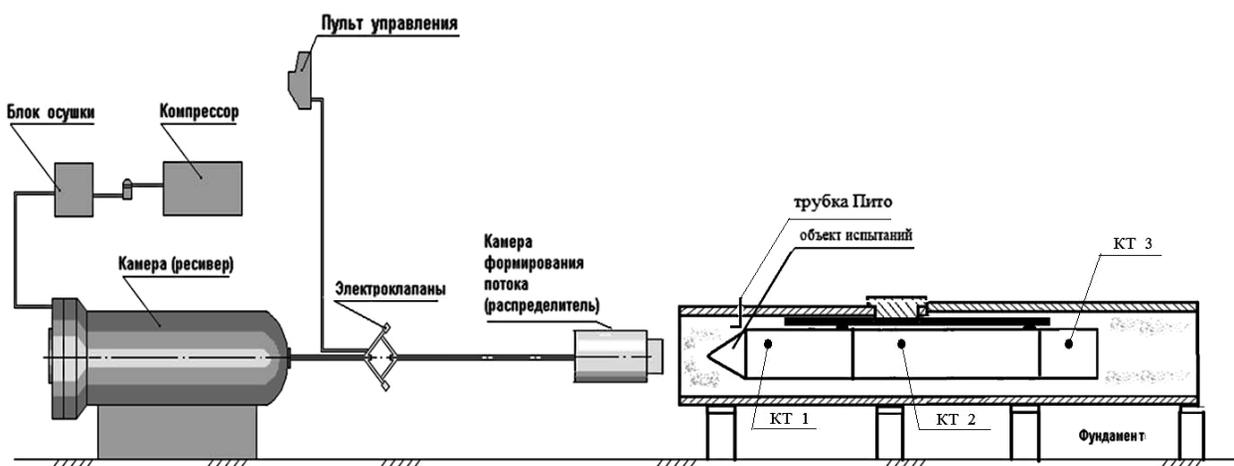


Рис. 2. Схема нагружений ЛА

контрольной точке (КТ) 3 в условных единицах (обозначение на рисунке — усл. ед.).

На рис. 4–6 приведены реализованные уровни СКЗ виброускорения (обозначение на рисунках в условных единицах ( $m/c^2$ ) — усл. ед.) в контрольных точках (КТ 1, 2, 3) ЛА в сравнении с уровнями (заданное распределение), полученными в натуральных условиях (обозначение на рисунках — заданное распределение).

В результате экспериментальной отработки методики испытаний:

- смоделировано натурное аэродинамическое воздействие ЛА методом обдува в струе воздушного потока со скоростями в диапазоне от 0,3 до 1,05 Маха;

- получены экспериментальные данные для формирования наземных испытательных режимов и верификации расчетных математических моделей;

- определены собственные частоты ЛА (рис. 3), на которых реализуется максимальный уровень энергии;

- подтвержден общепринятый в практике анализа вибрационного состояния ЛА факт — при увеличении внешнего воздействующего фактора пропорционально увеличивается нагруженность (СКЗ ускорения) конструктивных элементов ЛА.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность воспроизведе-

Таблица

**Значения параметров работы стенда ВПАД и характеристики воздушной струи, зарегистрированные в опытах**

Номер опыта	Давление в ресивере (начальное) $P_{\text{рес}}$ , МПа	Давление перед соплом $P_{\text{вых}}$ , МПа	Число Маха, $M$	Скоростной напор, $q$ , кПа
1	14,8	1,1	1,05	67,8
2	9,2	0,6	0,5	16,2
3	7,0	0,2	0,3	7,2

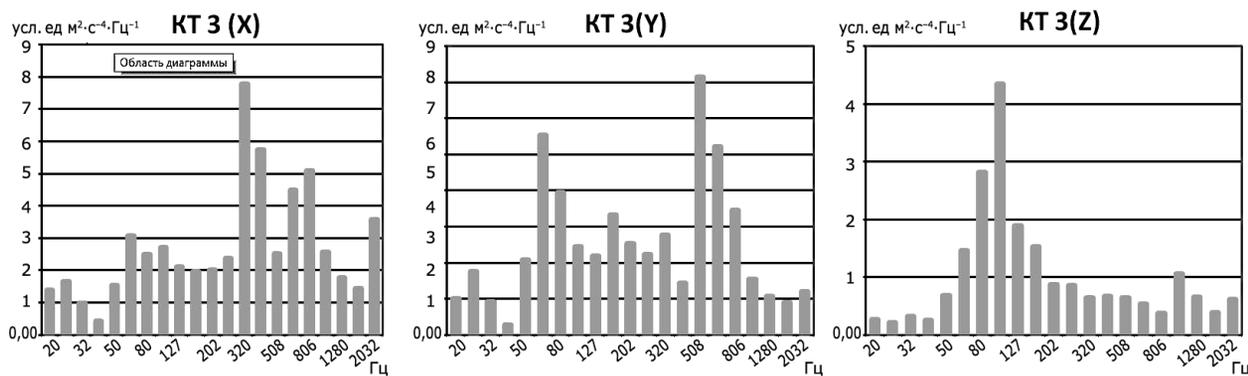


Рис. 3. Спектры ускорения в КТ 3 в опыте № 1

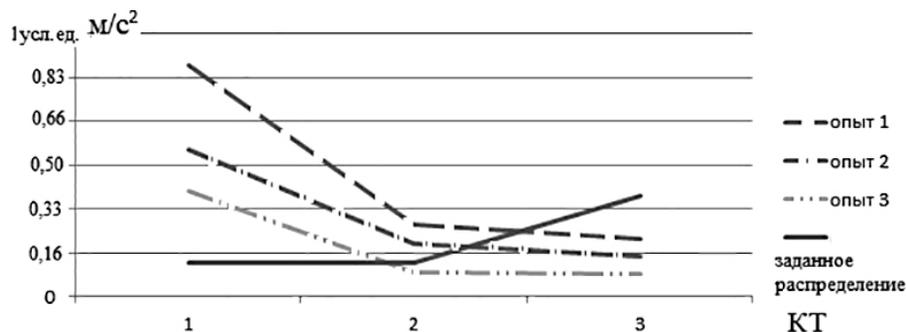


Рис. 4. Распределение уровней ускорения в КТ 1, 2, 3 ЛА, ось X

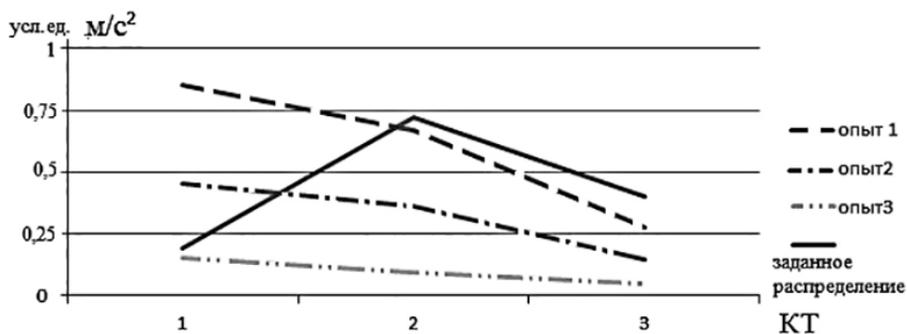


Рис. 5. Распределение уровней ускорения в КТ 1, 2, 3 ЛА, ось Y

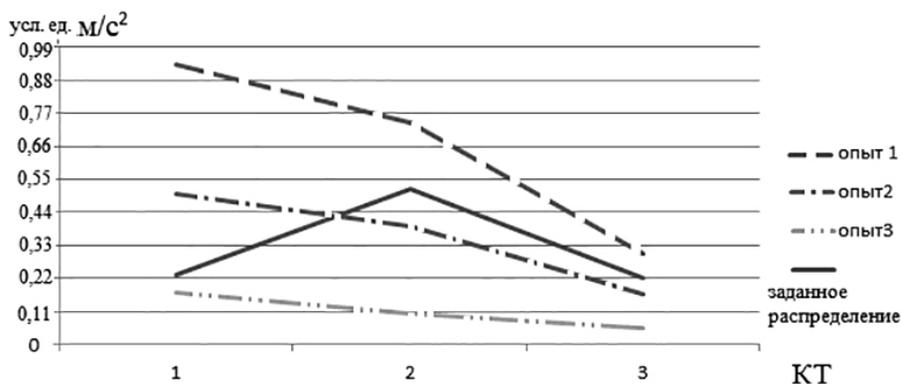


Рис. 6. Распределение уровней ускорения в КТ 1, 2, 3 ЛА, ось Z

ния на стенде ВПАД вибрации ЛА, имитирующей вибрацию, возникающую в натуральных условиях эксплуатации. С учетом актуальности вышесказанного подтверждена возможность полунатурного моделирования условий полета ЛА, с целью назначения и прогнозирования расчетных вибрационных нагрузок, до проведения натуральных опытов с ЛА в летных комплексах.

#### Список источников

1. Технические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская и [др.]. М.: Логос, 2003. 736 с.
2. Кринецкий Е.И., Александровская Л.Н., Шаронов А.В., Голубков А.С. Летные испытания ракет и космических аппаратов: учеб. пособие для технических вузов. М.: Машиностроение, 1979. 464 с.
3. Меньшаков Ю.К. Гиперзвуковые воздушно-космические системы и другое перспектив-

ное оружие. М.: ОАО «Можайский полиграфический комбинат», 2020. 313 с.

4. Карбовский В.А. Вибронагружение тела вращения с оперением. Снежинск: Изд-во «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2009. 116 с.
5. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах / В.Н. Челомей и [др.]. М.: Машиностроение, 1981.
6. Поун А., Гойн К. Аэродинамические трубы больших скоростей; пер. с англ.; под ред. Н.Н. Широкова. М.: Мир, 1968. 503 с.
7. Городнов А.В., Засухин В.В., Проскурин А.В. и др. Вибрационные испытания конической оболочки при кратковременном нагружении в сверхзвуковом потоке // Наука и технологии. Том 1. Труды XXVIII Российской школы. М.: Российская академия наук, 2008. 273 с.
8. Хоурт Л. Современное состояние аэродинамики больших скоростей. Том 1. М.: Иностранная литература, 1956. 382 с.
9. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н. и др. Прикладная аэродинамика; под ред. Краснова Н.Ф.: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1974. 732 с.