

**УДК 629.78:534.1****ВИБРАЦИОННЫЕ И УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ЗАЩИТЫ****Шпынкова Виктория Дмитриевна,**

Специалитет 5 курса направление «Системы управления летательными аппаратами»
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет). Москва, Россия
shpynkova.viktoria@mail.ru

Деменев Дмитрий Андреевич,

Старший преподаватель кафедр ФН-7 (Электротехника и промышленная электроника),
ИУ-1 (Системы автоматического управления)
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия
demenev@bmstu.ru

Аннотация

В данной работе представлены основные сведения о ключевых механических нагрузках, воздействующих на космическую технику в процессе выведения на орбиту и штатного функционирования. Проанализирована природа вибрационных, ударных и акустических факторов, а также их деструктивное влияние на элементы конструкции и бортовую аппаратуру. Особый акцент сделан на анализе резонансных явлений, собственных частот и случайных вибраций. В статье также освещены современные подходы к численному моделированию и экспериментальной верификации прочности космических аппаратов, включая методы минимизации негативного воздействия внешних нагрузок.

Ключевые слова: космический аппарат, механические нагрузки, вибрация, ударные воздействия, акустические нагрузки, резонанс, собственные частоты, математическое моделирование, виброизоляция.

**VIBRATIONAL AND IMPACT EFFECTS ON SPACE VEHICLE STRUCTURES:
ANALYSIS AND PROTECTION METHODS****Shpynkova Victoria Dmitrievna,**

5th-year specialist, majoring in "Aircraft Control Systems", Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia
shpynkova.viktoria@mail.ru

Demenev Dmitry Andreevich,

Senior Lecturer at the Departments FN-7 (Electrical Engineering and Industrial Electronics) and IU-1 (Automatic Control Systems), Bauman Moscow State Technical University (National Research University),

Moscow, Russia
demenev@bmstu.ru

ABSTRACT

This paper presents the main information about the key mechanical loads acting on space technology during launch into orbit and normal operation. The nature of vibration, impact, and acoustic factors is analysed, as well as their destructive impact on structural elements and onboard equipment. Special emphasis is placed on the analysis of resonance phenomena, natural frequencies, and random vibrations. The article also covers modern approaches to numerical modelling and experimental verification of the strength of spacecraft, including methods for minimising the negative impact of external loads.

Keywords: spacecraft, mechanical loads, vibration, impact effects, acoustic loads, resonance, natural frequencies, mathematical modeling, vibration isolation.

Современные космические аппараты представляют собой сложные технические системы, включающие несущие конструкции, электронное оборудование, системы управления, электропитания, связи и другие элементы. Надёжность космического аппарата имеет особое значение, поскольку после его вывода на орбиту возможность проведения ремонта и технического обслуживания существенно ограничена.

Одним из наиболее сложных этапов является запуск космического аппарата. В этот период конструкция подвергается различным механическим воздействиям, возникающим вследствие работы двигателей ракеты-носителя, вибрации, акустического воздействия, разделения ступеней и работы различных механизмов [1]. В связи с этим оценка устойчивости космического аппарата к механическим нагрузкам является важной частью его проектирования и испытаний.

В процессе эксплуатации космические аппараты (КА) подвергаются комплексному механическому воздействию, которое принято разделять на вибрационные, ударные и акустические нагрузки. Специфика этих воздействий определяется как конструктивными особенностями самого аппарата, так и текущим этапом его жизненного цикла.

Вибрационные нагрузки обусловлены преимущественно функционированием двигательных установок ракеты-носителя, передающих колебания через силовые элементы конструкции. Кроме того, источниками вибрации могут выступать внутренние бортовые системы и механизмы самого КА [2].

Ударные воздействия отличаются кратковременностью и высокой интенсивностью. Они возникают в моменты срабатывания пиротехнических средств, разделения ступеней ракеты-носителя, отделения аппарата от носителя, а также при разворачивании бортовых конструкций [3].

Акустические нагрузки порождаются интенсивным шумом работающих двигателей ракеты-носителя. Звуковое давление вызывает вибрацию обшивки и панелей аппарата, которая затем передается на внутреннее оборудование [4].

Вибрация — критический фактор, определяющий надежность космической техники. Каждая конструкция характеризуется набором собственных частот и форм колебаний. Опасность представляет резонанс, возникающий при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой системы. Резонансные явления провоцируют резкое возрастание амплитуды колебаний и, как следствие, критические механические

напряжения, поэтому расчет собственных частот является обязательным этапом динамического анализа КА [1, 2].

Особое внимание при проектировании уделяется случайной вибрации. В отличие от гармонических колебаний, она охватывает широкий частотный спектр и обладает нестационарным характером. Учет случайной вибрации необходим для адекватной оценки прочностных характеристик и долговечности конструкции в реальных условиях пуска [1].

Длительная вибрационная нагрузка провоцирует усталостные повреждения материалов. Наиболее уязвимыми узлами являются места соединений, крепежные элементы, а также электронная компонентная база и печатные платы. В связи с этим анализ виброустойчивости должен охватывать не только силовой каркас, но и все внутреннее оборудование аппарата.

Ударные воздействия характеризуются высокой мощностью при крайне малой длительности. Даже кратковременный импульс способен вызвать критические напряжения в деталях конструкции.

К основным причинам возникновения таких нагрузок в ракетно-космической технике относятся: срабатывание пиропатронов, процессы расстыковки ступеней ракеты-носителя, отделение полезной нагрузки и работа систем раскрытия механизмов [3].

Наиболее уязвимым к ударным воздействиям является бортовое электронное оборудование. Последствиями таких нагрузок могут стать разрушение крепежных узлов, разрыв электрических цепей, выход из строя электронных компонентов и нарушение юстировки высокочувствительных приборов.

Для подтверждения стойкости аппаратуры к ударам применяются как аналитические расчеты, так и натурные испытания. При этом критерием успешности является не только целостность конструкции, но и сохранение работоспособности оборудования после перенесенного воздействия [3, 5].

Изучение динамики космических аппаратов базируется на сочетании расчетных и экспериментальных подходов. Ключевым инструментом на этапе проектирования является компьютерное моделирование, позволяющее прогнозировать поведение изделия до создания его физического прототипа.

В ходе динамического анализа вычисляются собственные частоты и формы колебаний, а также оценивается отклик системы на вибрации и удары. Применение метода конечных элементов дает возможность детально исследовать сложные узлы и выявить зоны, наиболее подверженные риску механических повреждений [1].

Важнейшим этапом является верификация расчетных данных в ходе экспериментальных проверок. Вибрационные и акустические тесты позволяют определить реальную реакцию конструкции на внешние факторы. Так, для аппаратов открытого типа проводятся испытания на электродинамических вибростендах и воздействие звуковым давлением в реверберационных камерах [4].

Экспериментальная отработка необходима для обнаружения конструктивных недочетов и подтверждения соответствия фактических параметров проектным значениям. Порядок проведения этих процедур и требования к прочности автоматических космических аппаратов определяются действующими отраслевыми стандартами [5].

Для минимизации негативного влияния вибраций и ударных импульсов на космическую технику задействуется комплекс инженерных решений.

Ключевым методом является виброзащита, базирующаяся на внедрении демпфирующих устройств, систем гашения колебаний и виброизолирующих опор. Выбор конкретных средств защиты определяется спецификой компоновки аппарата и спектральными характеристиками внешних воздействий [2].

Не менее значимым подходом выступает конструктивная оптимизация. Корректировка геометрии узлов, подбор материалов с необходимыми физико-механическими свойствами и совершенствование соединительных элементов позволяют управлять динамическими параметрами системы, предотвращая возникновение критических резонансов.

Для защиты высокочувствительной бортовой электроники часто применяется локальная виброизоляция, которая препятствует передаче вибрационной энергии от силового каркаса непосредственно к электронным компонентам.

Интеграция методов математического моделирования, конструкторской оптимизации и натурных испытаний является залогом высокой механической прочности и надежности космических аппаратов.

Вибрационные, акустические и ударные нагрузки — критические факторы, определяющие работоспособность космической техники. Наиболее интенсивное механическое воздействие приходится на этап выведения, когда на аппарат влияют работа двигателей ракеты-носителя, процессы разделения ступеней и срабатывание пиротехнических средств.

Вибрации способны провоцировать резонансные явления, многократно увеличивая динамические напряжения. Случайные вибрации представляют серьезную угрозу для целостности конструкции и стабильности работы электроники. Ударные нагрузки, несмотря на кратковременный характер, обладают высокой разрушительной силой, способной вывести из строя бортовые системы.

Для верификации стойкости аппаратов применяются методы компьютерного моделирования, динамического анализа, а также комплексные наземные испытания. Комбинация расчетных данных и экспериментальных результатов позволяет своевременно обнаруживать уязвимые узлы и внедрять эффективные защитные меры.

Таким образом, глубокий анализ механических воздействий — неотъемлемая часть процесса проектирования. Развитие технологий моделирования и совершенствование систем виброзащиты напрямую способствуют повышению надежности и долговечности космических аппаратов.

Список литературы:

1. Ермаков В. Ю., Туфан А. Динамика космических аппаратов: учебное пособие. — Москва: Изд-во МАИ, 2023. — 92 с. — ISBN 978-5-4316-1032-5.
2. Телепнев П. П., Кузнецов Д. А. Основы проектирования виброзащиты космических аппаратов: учебное пособие / под ред. В. В. Ефанова. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 102, [4] с. — ISBN 978-5-7038-5103-6.
3. Тестоедов Н. А., Лысенко Е. А. Экспериментальная отработка космических аппаратов на механические воздействия: учебное пособие для студентов аэрокосмических специальностей. — Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т им. М. Ф. Решетнёва, 2008. — 149, [1] с. — ISBN 978-5-86433-354-9.
4. Лысенко Е. А., Бернс В. А. Виброакустическая диагностика космических аппаратов открытого (негерметичного) исполнения // Динамика и виброакустика. — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 47–54. — DOI: 10.18287/2409-4579-2016-3-1-47-54.
5. ГОСТ Р 56514–2015. Нормы прочности автоматических космических аппаратов. — Москва: Стандартинформ, 2015. — Введ. 01.01.2016.

References:

1. Ermakov V. Yu., Tufan A. Dynamics of Spacecraft: a textbook. — Moscow: MAI Publishing House, 2023. — 92 p. — ISBN 978-5-4316-1032-5.
2. Telepnev P. P., Kuznetsov D. A. Fundamentals of Designing Vibration Protection for Spacecraft: a textbook / edited by V. V. Efanov. — Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2019. — 102, [4] p. — ISBN 978-5-7038-5103-6.
3. Testoedov N. A., Lysenko E. A. Experimental testing of spacecraft for mechanical effects: a textbook for students of aerospace specialties. — Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University. M. F. Reshetnev University, 2008. — 149, [1] p. — ISBN 978-5-86433-354-9.
4. Lysenko E. A., Burns V. A. Vibroacoustic diagnostics of open (non-sealed) spacecraft // Dynamics and Vibroacoustics. — 2016. — Vol. 3, No. 1. — Pp. 47-54. — DOI: 10.18287/2409-4579-2016-3-1-47-54.
5. GOST R 56514-2015. Strength standards for automatic spacecraft. — Moscow: Standartinform, 2015. — Introduced. 01.01.2016.