

УДК 629.78.08.002.71

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АМОРТИЗАЦИОННЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ТРАНСПОРТНОМ КОНТЕЙНЕРЕ

Н. А. Тестоедов², С. Н. Лозовенко¹, Е. Н. Головёнкин², А. И. Антипов¹, А. В. Цайтлер²

¹ ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: loco@iss-reshetnev.ru

Рассмотрены варианты конструктивного исполнения, особенности, технологии изготовления, отработки и эксплуатации амортизационных платформ, разработанных в ОАО «ИСС». Предметом работы является проблема доставки автоматических космических аппаратов без снижения требуемых показателей надежности. Одним из путей решения поставленной задачи является снижение негативного воздействия механических нагрузок на автоматические космические аппараты путем использования амортизационных платформ для их закрепления в транспортном контейнере. Представлены результаты исследований в области построения системы амортизации на основе тросовых виброизоляционных элементов. Описана технология изготовления и отработки тросовых амортизаторов с требуемыми виброзащитными характеристиками. Описаны результаты практического применения полученных результатов. Результаты могут быть применимы в ракетно-космической отрасли и в иных областях, в которых используются средства вибрационной защиты.

Ключевые слова: тросовый амортизатор, амортизационная платформа, транспортный контейнер, космический аппарат.

SOME ASPECTS OF ALTERNATE DESIGN, PRODUCTION TECHNOLOGY, TESTS AND OPERATION OF AMORTIZATION PLATFORM FOR FIXATION OF AUTOMATIC SPACECRAFT IN TRANSPORT CONTAINER

N. A. Testoedov², S. N. Lozovenko¹, E. N. Golovenkin², A. I. Antipiev¹, A. V. Tsaytler²

¹ JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: loco@iss-reshetnev.ru

The variants of alternate design, features, manufacturing technique, trying out and operation of cowcatchers, manufactured by JSC "ISS", are reviewed. The subject of this work is a problem of shipment of the automatic spacecraft without reducing the required reliability. One of the solutions is to reduce the negative impact of the mechanical stress on the automatic spacecraft using the amortization platform for their fixing in the transport container. Results of researches in the field of vibration isolation system design based on the flexible vibration-isolating elements are presented. The production technology and testing of the rope shock absorbers with the required vibration isolation characteristics are described. Results of practical application of the received results are reviewed. The results can be applied in the space-rocket field and other fields, where vibration protection means are used.

Keywords: rope shock absorber, amortization platform, transport container, spacecraft.

В виду высоких требований к обеспечению безопасности автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки при транспортировании, эффективным способом их защиты от воздействия динамических нагрузок (вибрации, ударных нагрузок, акустических колебаний) является применение амортизационных платформ для закрепления автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки в транспортном контейнере.

Система амортизации должна обеспечивать защиту автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки от воздействия динамических нагрузок по трем взаимно перпендикулярным направлениям [1]:

- а) в направлении перпендикулярном горизонтальной поверхности контейнера;
- б) в направлении поперечном направлению движения транспортного средства;

в) в направлении движения транспортного средства.

В настоящее время используются различные средства гашения динамических нагрузок, успешно используемые в различных областях техники.

Научно-практический опыт, накопленный в ОАО «ИСС» при наземной эксплуатации космических аппаратов и их полезной нагрузки, позволяет достаточно уверенно сказать, что наиболее эффективным способом их защиты от негативного воздействия динамических нагрузок, возникающих при транспортировании, является применение в конструкции транспортных контейнеров систем амортизации (амортизационных платформ) на базе тросовых амортизаторов. Тросовые амортизаторы выбраны по ряду преимуществ, в сравнении с другими видами амортизаторов, главными из которых являются [1]:

- более эффективное демпфирование динамической нагрузки;
- меньшие массогабаритные характеристики, что очень важно, учитывая ограничения перевозчика по размерам транспортных контейнеров.

Демпфирование обеспечивается за счет сухого трения между проволоками и прядями стального каната, при этом механическая энергия преобразуется в тепловую, что обеспечивает увеличение эффективности удара- и виброзащиты с увеличением ампли-

туды перемещения. А при попадании системы в область резонансных частот амплитуда колебаний тросовых амортизаторов увеличивается в 4–8 раза против 4–6 раз у резинометаллических амортизаторов.

Патентная база данных содержит описание различных вариантов конструктивного исполнения тросовых амортизаторов [2]:

1. С прямоугольными планками (рис. 1).
2. С кольцевыми пластинами и радиальными отверстиями под трос (рис. 2).
3. С плоскими и волнообразными изогнутыми кольцевыми пластинами (рис. 3).
4. С прямоугольными пластинами и хомутами под трос (рис. 4).

Тросовые амортизаторы с прямоугольными планками (рис. 1) в сравнении с остальными представленными вариантами конструктивного исполнения тросовых амортизаторов обеспечивают устойчивость к боковым воздействиям и наиболее просты в изготовлении.

Тросовые амортизаторы, разработанные в ОАО «ИСС», (рис. 5) представляют собой конструкцию, содержащую упругий элемент в виде спирали из стального каната, четыре пластины (внутренние и внешние) с выемками под канат, установленные по две на витках каната в диаметрально противоположных точках окружности спирали [3].

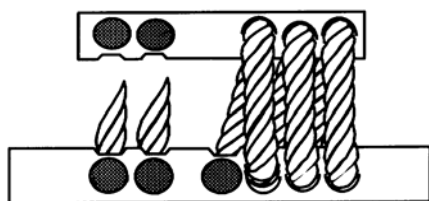


Рис. 1. Тросовый амортизатор с прямоугольными планками

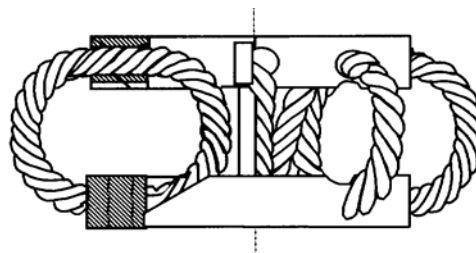


Рис. 2. Тросовый амортизатор с кольцевыми пластинами и радиальными отверстиями под трос

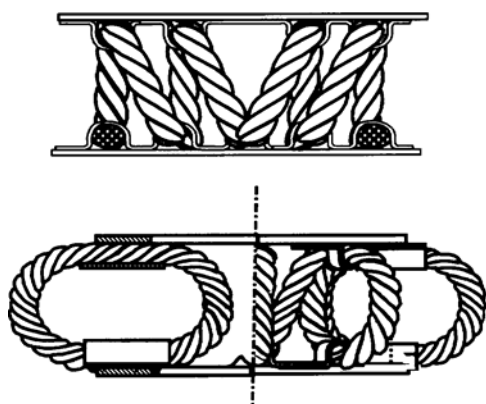


Рис. 3. Тросовый амортизатор с плоскими и волнообразными изогнутыми кольцевыми пластинами

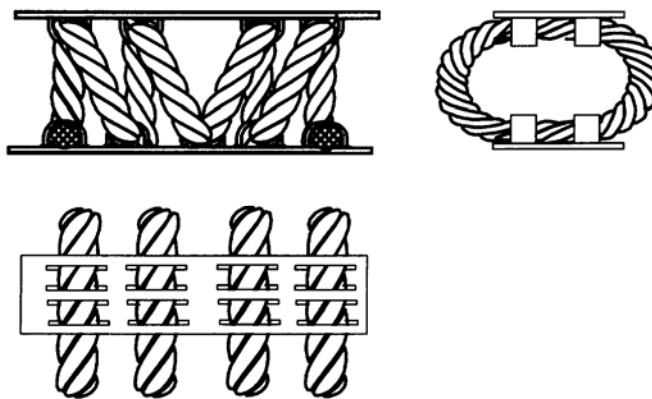


Рис. 4. Тросовый амортизатор с прямоугольными пластинами и хомутами под трос

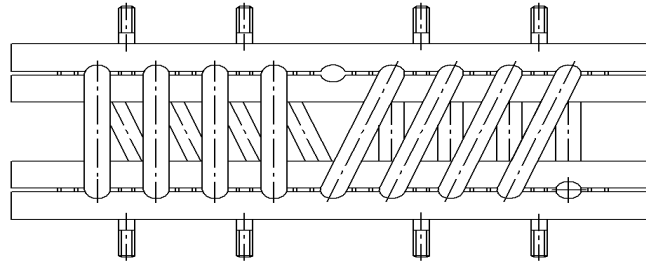


Рис. 5. Схема расположения витков каната в амортизаторе КТ-КА.9640-150

Конструктивной особенностью тросовых амортизаторов разработки ОАО «ИСС» является расположение витков каната, которое обеспечивает устойчивость к боковым усилиям и равномерно распределяет действующую нагрузку по конструкции амортизатора. Количество витков каната выбирается с учетом заданной нагрузки на тросовый амортизатор, исходя из требуемой жесткости и несущей способности амортизатора.

В общем случае эффективность работы системы амортизации определяется коэффициентом виброизоляции [4]:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{f^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{K_d} \left(\frac{\omega}{f}\right)^2\right)^2}},$$

где f – собственная частота колебаний системы амортизации с космическим аппаратом или его полезной нагрузкой; ω – частота возбуждения; K_d – коэффициент динамичности.

Очевидно, что система виброизоляции эффективна только в том случае, когда отношение ω/f велико, т. е. если собственная частота системы амортизации мала по сравнению с частотой возмущения.

Одним из методов снижения частоты собственных колебаний системы амортизации без уменьшения ее жесткости является искусственное увеличение массы объекта.

Анализ практических результатов испытаний тросовых амортизаторов, разработанных в ОАО «ИСС», показал, что собственная частота колебаний системы амортизации на базе тросовых амортизаторов с космическим аппаратом или его полезной нагрузкой в боковом направлении составляет 2–7 Гц, в вертикальном направлении 5–12 Гц. Данный диапазон частот

собственных колебаний является еще одним преимуществом в сравнении с другими видами амортизаторов, так как расчетное значение эффективности системы амортизации достигается при частоте 7 Гц и ниже (например, собственная частота колебаний системы амортизации на базе резинометаллических амортизаторов составляет порядка 25 Гц).

В ОАО «ИСС» разработаны и используются различные технологии изготовления тросовых амортизаторов.

Рассмотрим технологический процесс изготовления тросовых амортизаторов на примере изготовления амортизаторов КТ-КА.9640-150.

Для начала необходимо подготовить канат к вытяжке (рис. 6, 7).

Далее производится вытяжка каната для стабилизации и равномерного распределения проволочек в канате. По окончании вытяжки необходимо проверить канат на отсутствие обрывов проволок и механических повреждений. В настоящее время ОАО «ИСС» в качестве оборудования используемого для вытяжки каната использует автоматизированную систему САУ-СН-10К, при использовании которой нагружение производится с помощью задания оператором необходимой нагрузки через систему на гидроцилиндр, соединенный с канатом.

Следующими этапами изготовления тросовых амортизаторов являются подготовка, навивка каната на пластины и сборка тросового амортизатора (рис. 8–11).

К технологии изготовления тросовых амортизаторов необходимо относиться с особым вниманием и ответственностью. Кажущаяся на первый взгляд простота описанной технологии вытяжки и навивки каната таит в себе сложные конструкторские проработки, правильность которых выясняется после проведения испытаний тросовых амортизаторов.

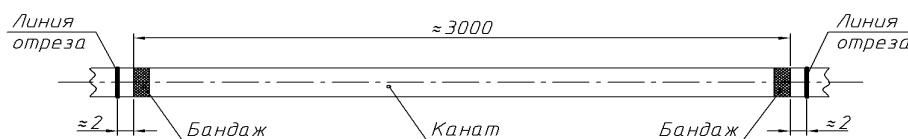


Рис. 6. Подготовка каната к вытяжке

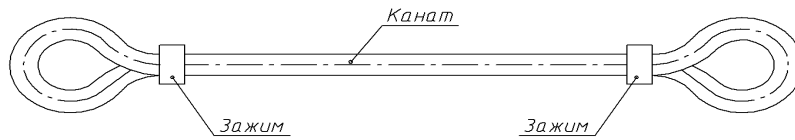


Рис. 7. Заделка концов каната петлей и установка зажимов

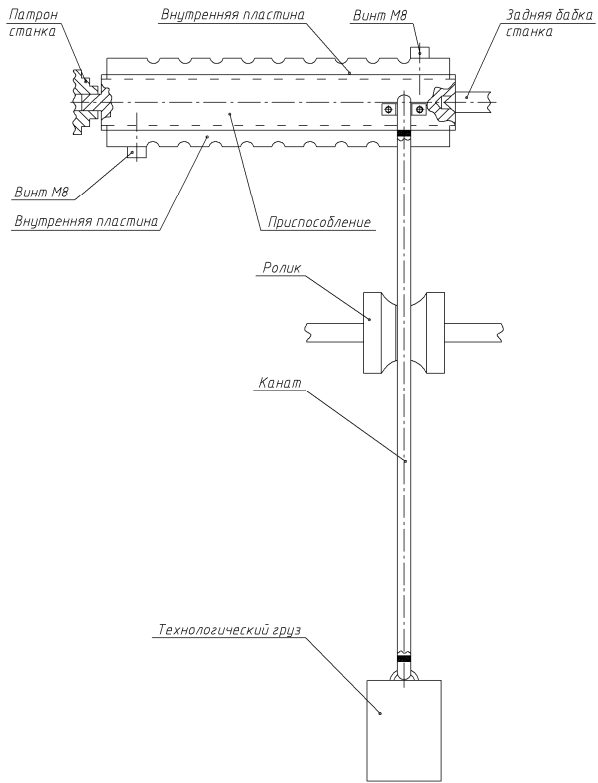


Рис. 8. Подготовка к навивке каната

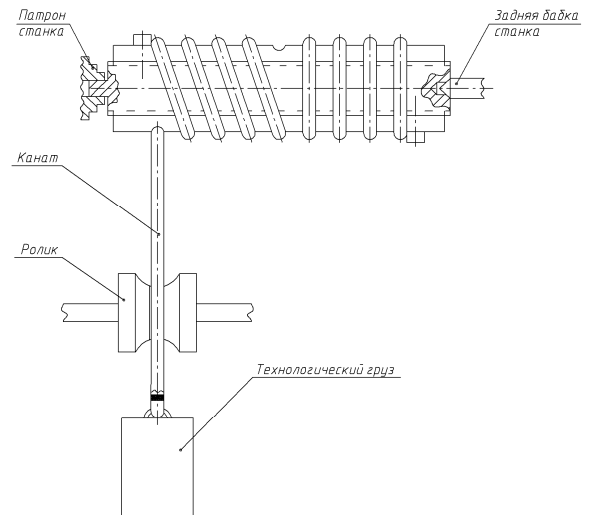


Рис. 9. Навивка каната

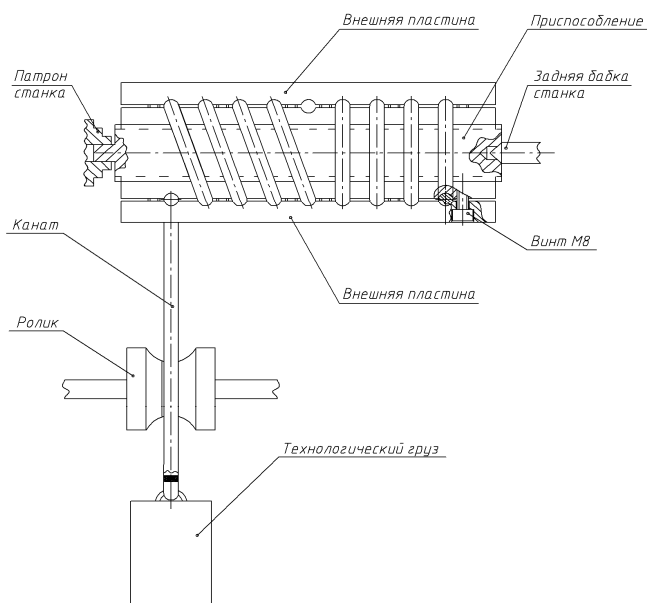


Рис. 10. Обжатие каната пластинами

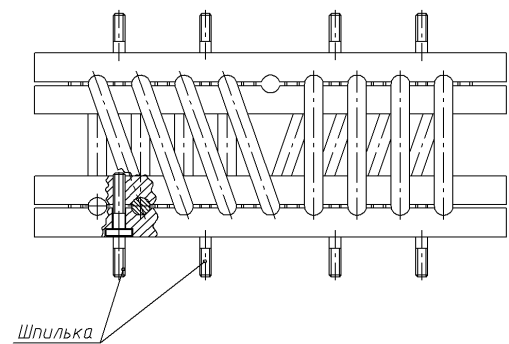


Рис. 11. Установка шпилек

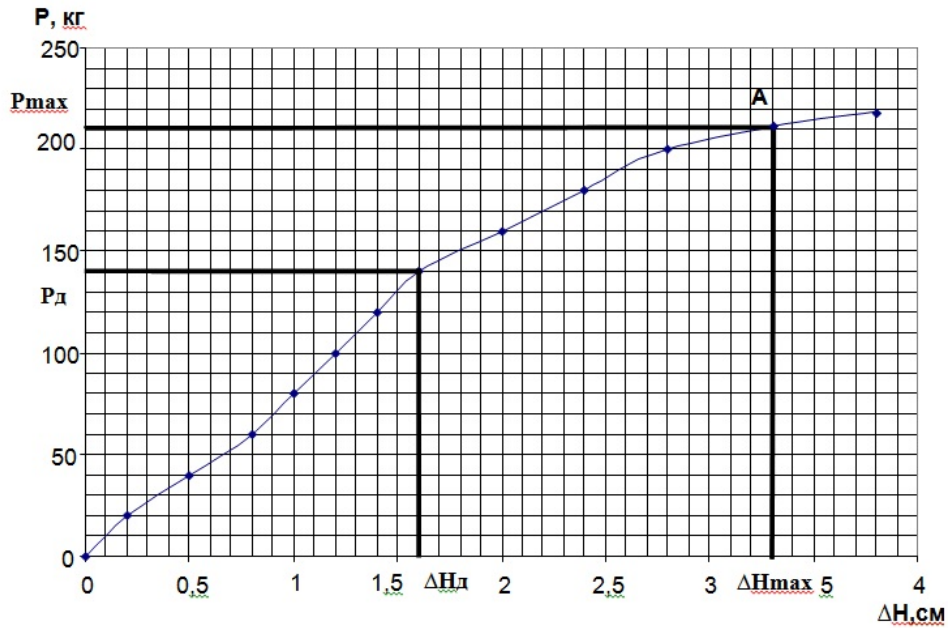


Рис. 12. График жесткости амортизатора (пример)

Испытания амортизаторов КТ-КА.9640-150 проводятся в два этапа.

На первом этапе испытываются три амортизатора для определения их несущей способности. Испытательная оснастка должна обеспечивать сжатие и растяжение амортизаторов только в вертикальном направлении, смещение от вертикальной оси не допускается. Перед проведением испытаний замеряется размер H_0 каждого амортизатора (рис. 13). Поочередно испытывается три амортизатора согласно схеме испытаний, прикладывая нагрузку P с дискретностью в 20 кг, при этом необходимо измерять размер изменившейся высоты H_i амортизатора после каждого нагружения. При каждом нагружении конструкция выдерживается в течение 1 ± 2 минут. Нагружение амортизатора продолжается до соприкосновения его пластин между собой. В случае несоответствия предполагаемому изменению высоты H_i амортизаторов при каждом нагружении до соприкосновения их пластин допускается производить их разборку и повторную навивку каната. Строится график зависимости силы от перемещения амортизаторов (рис. 12) и по нему определяется значение максимальной жесткости. Из графика видно, что в точке А возникает максимальное изменение высоты амортизатора при предельной нагрузке, при которой амортизатор начинает работать в упругой зоне, без остаточной деформации.

Допустимые значения несущей способности определяются по формуле: $P_{Di} = \frac{P_{max}}{1,5}$.

По результатам первого этапа испытаний определяются средние значения допустимой нагрузки по формуле: $P_{Dcp} = \frac{\sum_{i=1,2,3} P_{Di}}{3}$, и величина номи-

нального значения $\Delta H_{ном}$ по формуле

$$\Delta H_{ном} = \frac{\sum_{i=1,2,3} \Delta H_{Di}}{3}.$$

На втором этапе испытывается вся партия амортизаторов, заложенных в конструкторском документе, с целью проверки их фактической жесткости и определения их фактической несущей способности. Поочередно производятся нагружения каждого амортизатора нагрузкой P_{Dcp} (рис. 13) в течение 10 минут, при этом производится замер изменения высоты ΔH амортизатора. По окончании испытаний сравниваются значения изменения высоты каждого амортизатора, и делается вывод о качестве изготовления амортизаторов. Допустимое отклонение ΔH у партии амортизаторов должно быть не более $\pm 10\%$ от номинального значения. На амортизаторах, не удовлетворяющих этому требованию, производится повторная навивка каната и в той же последовательности повторяются испытания по двум этапам.

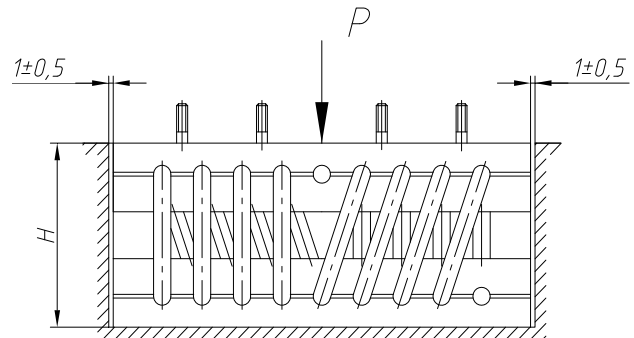


Рис. 13. Схема испытания тросового амортизатора

По завершении проведения испытаний амортизаторов в зависимости от их фактической несущей способности определяется оптимальное количество тросовых амортизаторов для амортизационных платформ с целью восприятия заданной механической нагрузки.

Варьируя диаметром троса и количеством тросовых амортизаторов теоретически можно обеспечить практически любую несущую способность системы амортизации.

Варианты конструктивного исполнения амортизационных платформ на базе тросовых амортизаторов, разработанных в ОАО «ИСС», обеспечивают снижение механических нагрузок на космический аппарат до допустимого уровня, при его массе до 600 кг.

Сформированные в настоящее время в ОАО «ИСС» алгоритмы проектирования и отработки дают возможность задать оптимальный конструктивный облик системе амортизации, а технологии изготовления амортизационных платформ, применяемых в конструкции транспортных контейнеров разработки ОАО «ИСС», гарантированно обеспечивают получение требуемых проектных параметров. В настоящее время отработана конструкция тросовых амортизаторов с диаметром каната от 5 до 17 мм, которые успешно применяются в транспортных контейнерах для перевозки полезной нагрузки, ее конструктивных элементов и космического аппарата в целом.

Оптимальным вариантом конструктивного исполнения амортизационных платформ является расположение тросовых амортизаторов с каждой боковой стороны амортизационной платформы для компенсации и равномерного распределения действующих сил на систему амортизаторов. Конструктивной особенностью амортизационных платформ является то, что тросовые амортизаторы закреплены на раме и основании контейнера таким образом, что угол между линией, проходящей через точки крепления, равен 45° относительно вертикальной оси, для более эффективного демпфирования динамической нагрузки по трем взаимно перпендикулярным направлениям за счет увеличения рабочей области канатов амортизаторов.

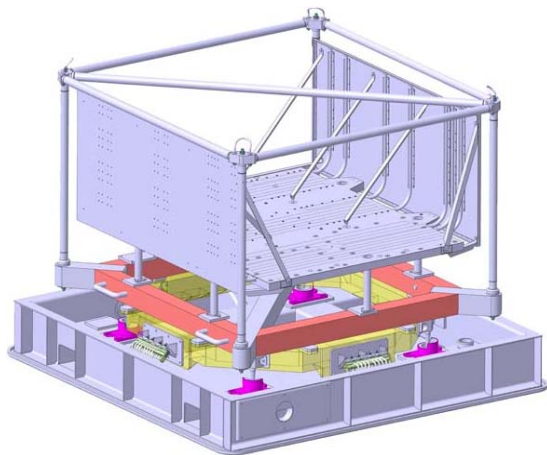


Рис. 14. Контейнер 14Ф31.9427-0

На рис. 14–16 представлены некоторые варианты расположения амортизационных платформ в различных транспортных контейнерах, разработанных в ОАО «ИСС» [3; 5].

Транспортирование автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки в транспортных контейнерах осуществляется на различных видах транспорта (автомобильном, авиационном, железнодорожном). В связи с возникающими перегрузками, особенно при железнодорожном транспортировании, для проверки эффективности и готовности к штатной эксплуатации амортизационные платформы подвергаются транспортировочным испытаниям.

В качестве примера рассмотрим испытания амортизационных платформ контейнера КТ-КА.9640-0, предназначенного для транспортирования космического аппарата «Канопус-В». Перед проведением транспортировочных испытаний на основании и раме контейнера закреплялись регистраторы, предназначенные для регистрации перегрузок. Испытания контейнера проводились на автомобильном транспорте с закрепленным имитатором КА на опоре, которая через амортизационную платформу крепилась с основанием контейнера (рис. 15). По окончании испытаний проводилась оценка эффективности системы амортизации, и принималось решение о допуске к штатной эксплуатации.

Успешность проведения испытаний амортизационных платформ подтверждает правильность выбора оптимального количества тросовых амортизаторов для амортизационных платформ и гарантирует защиту автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки от воздействия динамических нагрузок во время транспортирования.

За последние 10 лет в ОАО «ИСС» разработано 6 транспортных контейнеров с системой амортизации и опыт их эксплуатации позволил сформировать необходимые указания по эксплуатации амортизационных платформ в обеспечение сохранения их характеристик в течение всего срока службы.



Рис. 15. Контейнер КТ-КА.9640-0

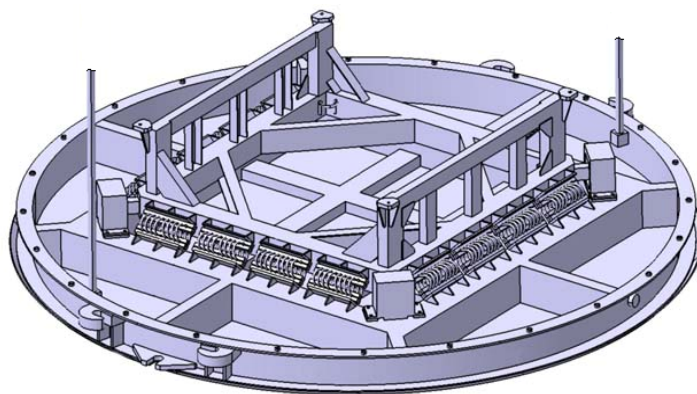


Рис. 16. Контейнер транспортный 98Д.9812-0

При эксплуатации системы амортизации происходит ее естественный, амортизационный износ. Поддержание системы амортизации в работоспособном состоянии производится благодаря своевременному проведению технического обслуживания. Однако не производится оценка фактической жесткости амортизационных платформ, что не дает четкого представления о ее состоянии. Предлагается после 5–6 транспортирований с использованием системы амортизации производить подтверждение характеристик системы амортизации в условиях, максимально приближенных к условиям штатной эксплуатации. Накопленная информация позволит в дальнейшем предвидеть и рассчитать момент износа и выработки тросовых амортизаторов при определенной нагрузке на них, что является существенным моментом и позволит избежать не предвиденные ситуации и распланировать своевременную замену амортизационных платформ в случае необходимости. Выявленные тросовые амортизаторы с несоответствием жесткости требуемым параметрам необходимо заменять, поэтому в комплект ЗИП (запасных частей, инструментов и принадлежностей) контейнера транспортного необходимо закладывать запасные амортизаторы, предназначенные для замены вышедших из строя. Данный подход несет в себе экономически обоснованные затраты, которые не соизмеримы с экономическими затратами на изготовление и экспериментальную отработку космического аппарата.

Разработанные и используемые в ОАО «ИСС» системы виброзащиты прошли наземную эксплуатацию и зарекомендовали себя в обеспечении комфортных условий для автоматических космических аппаратов и их полезной нагрузки.

Представленный материал позволяет оценить возможности и эффективность использования амортизационных платформ в рассеивании энергии динамических нагрузок и получить достаточно полное представление о конструктивном исполнении и технологии их изготовления.

Библиографические ссылки

1. Проблематика снижения негативного воздействия механических нагрузок на космический аппарат

в течение его транспортирования / А. И. Антипов и др. // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. С. 293.

2. Пат. РФ № 2305809. Тросовый амортизатор (варианты) и способ его изготовления (варианты) / А. И. Макаренков, А. В. Слепов // Офиц. бюл. Федер. службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М. : ФИПС. 10.09.2007. Бюл. № 25.

3. КТ-КА.9640-0РЭ. Контейнер транспортный : руководство по эксплуатации. ОАО «ИСС», 2009.

4. Блехман И. И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 400 с.

5. 14Ф31.9427-0РЭ. Контейнер транспортный : руководство по эксплуатации. ОАО «ИСС», 2009.

References

1. Antipiev A. I., Bezrukih S. S., Golovenkin E. N., Melkomukov A. A., Tsaytler A. V. Range of problems of reduction of negative influence of mechanical load to satellite during its transportation [Problematika snizheniya negativnogo vozdeystviya mekhanicheskikh nagruzok na kosmicheskij apparat v techenie ego transportirovaniya]. *Materialy XIII Mezhduнародnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* (Proc. 13th Int. Sci. Conf. "Reshetnev Readings") Krasnoyarsk, 2009. p. 293.

2. Makarenkov A. I., Slepov, A. V. Patent RF № 2305809 "Trosovyy amortizator (varianty) i sposob ego izgotovleniya (varianty)" (Rope shock absorber and method of its making). *Ofitsial'nyy byulleten' Federal'noy sluzhby po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam* (Official bulletin of the Federal Institute of Industrial Property) Moscow, 2007. Bull. 25.

3. КТ-КА.9640-0РЕ. *Konteyner transportirovochnyy. Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Container shipping, operating manual). Zheleznogorsk, JSC "ISS", 2009.

4. Blekhan I. I. *Vibratsionnaya mekhanika* (Vibration mechanics). Moscow, Fizmatlit, 1994. 400 p.

5. 14F31.9427-0РЕ. *Konteyner transportnyy. Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Container transport, operating manual). Zheleznogorsk, JSC "ISS", 2009.