

A. G. Kuchkin, S. V. Hijnyak, E. Ya. Muchkina, M. E. Baranov, V. N. Anpilogov

**ANALYSIS OF ECOLOGICAL CONDITIONS ON OBJECTS OF OPERATION
OF ROCKET-SPACE TECHNICS OF THE MINISTRY OF DEFENCE
OF RUSSIAN FEDERATION**

The analysis of ecological conditions of special object of the Ministry of Defense of Russian Federation and the mechanism of restoration of chemically polluted soils, is given.

Keywords: soil, oil products, phytotoxicity, anthropogenous influence, space-rocket equipment.

© Кучкин А. Г., Хижняк С. В., Мучкина Е. Я., Баранов М. Е., Анпилов В. Н., 2012

УДК 629.01

Ю. П. Похабов

**ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОДНОРАЗОВОГО СРАБАТЫВАНИЯ
НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

Рассматривается один из подходов к обеспечению безотказности функционирования механических устройств одноразового срабатывания на космических аппаратах. Приводится перечень процедур по реализации указанного подхода.

Ключевые слова: космический аппарат, безотказность, механические устройства одноразового срабатывания, функционирование.

Базовые понятия и определения. Условия доставки космических аппаратов (КА) на околоземную орбиту накладывают ограничения на его габариты в соответствии с размерами зоны полезного груза (ЗПГ) ракеты-носителя (РН). Чтобы увеличить эксплуатационные возможности КА применяют механические устройства (МУ), которые позволяют осуществлять компактное складывание крупногабаритных бортовых конструкций КА в стартовое положение и их автоматическое развертывание в рабочее положение после отделения от РН [1]. Главной функциональной задачей таких МУ является однократное автоматическое перемещение (отделение, выдвижение или поворот) бортовых конструкций относительно корпуса КА после выведения на околоземную орбиту, в результате чего обретается его рабочая конфигурация, и создается возможность работы бортовых систем.

Современные концепции проектирования основаны на преимущественном использовании в составе КА двух классов МУ: отделяемых (системы отделения КА от последней ступени РН) и поворотных (МУ раскрытия солнечных батарей, трансформируемые крупногабаритные космические рефлекторы, устройства разворота рефлекторов антенн, штанги приборов и пр.). Главное отличие отделяемых и поворотных МУ заключается в том, что последние после развертывания на орбитальном участке полета остаются неотъемлемой частью КА в виде несущих конструкций солнечных батарей, рефлекторов, выносных конструкций приборов и антенн и пр.

Общепринятого термина для обозначения указанных классов МУ до сих пор не существует, в различных источниках они именуется по-разному: объекты одноразового использования [2], механизмы одноразового действия [3] и МУ одноразового срабатывания [4].

Слово «одноразовый» во всех употребляемых терминах служит ключевым понятием и указывает на целевую направленность выполнения задач МУ на орбитальном участке полета в условиях факторов космического пространства (ФКП) [5]. При этом в отличие от синонимов: «единичный» и «однократный», термин «одноразовый» охватывает весь жизненный цикл функционирования МУ, включающий помимо выполнения целевых задач еще и обеспечение проверок функционирования на стендах при заводских приемо-сдаточных испытаниях и (или) при наземной экспериментальной отработке. Соответственно, при проектировании МУ предусматривается возможность реверсного движения в ручном или автоматическом режиме во время наземных испытаний и проверок при срабатываниях в пределах не менее 50 циклов [6].

Таким образом, из рассмотренного синонимического ряда, термин «МУ одноразового срабатывания», по мнению автора, наиболее точно и однозначно раскрывает понятия, присущие его функционированию в течение жизненного цикла, и характеризует следующие свойства технического объекта:

1) способность осуществлять механические движения тел, изменяющие его положение в простран-

ве относительно других тел с течением времени по законам механики;

2) совокупность простейших механизмов (шарниры, рычаги, фиксаторы и пр.) и конструктивных элементов, связанных между собой нестационарными геометрическими и кинематическими связями для выполнения заданных функций;

3) автоматичность функционирования при срабатываниях;

4) однократность срабатывания для выполнения целевых задач;

5) возможность обеспечения определенного количества срабатываний в течение жизненного цикла для проведения проверок функционирования при испытаниях.

Помимо МУ одноразового срабатывания, в составе КА применяются МУ постоянного действия, непрерывно или эпизодически работающие в течение всего срока активного существования (САС). К таким МУ относятся поворотные устройства приводов солнечных батарей реверсного действия для ориентации фотоэлектрических преобразователей на Солнце, поворотные створки жалюзи системы терморегулирования для обеспечения заданного теплового режима внутри гермоконтейнера КА, блок механической системы наведения антенн (БМСНА) и пр. В основе указанного терминологического разграничения лежат различия требований и подходов к обеспечению надежности, характерных при одноразовом и длительном функционировании МУ. Подходы к обеспечению надежности МУ постоянного действия мало отличаются от подходов к обеспечению надежности КА в целом, которые, как известно, разрабатываются исходя из автономности работы в течение длительного (до 15 лет) САС в условиях дестабилизирующего воздействия широкого спектра ФКП [5; 7].

Постановка задачи надежности МУ одноразового срабатывания. Надежность, как свойство сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, является одной из важнейших эксплуатационных характеристик любого технического объекта [8]. Исходя из режимов (механические нагрузки, ФКП) и условий применения (единичность производства, ограниченность ЗПГ под головным обтекателем РН, длительность САС, невозможность ремонта), основными свойствами надежности КА являются безотказность и долговечность, как в целом, так и входящих в его состав бортовых систем и конструкций. Благодаря достижениям в теории надежности, подходы и методики по оценке и прогнозированию показателей технического состояния и надежности КА в достаточной степени разработаны [5; 9].

Напротив, для МУ одноразового срабатывания до сих пор не созданы научно-обоснованные подходы для глубокого анализа надежности, отчасти из-за нечетко сформулированной терминологии и малого числа работ, опубликованных по данной тематике [2; 4].

Применительно к МУ одноразового срабатывания основным свойством надежности является безотказность функционирования. Это определяется главным образом тем, что использование МУ одноразового

срабатывания резко увеличивает вероятность отказов и рисков потерь КА из-за сложности своего функционального и конструктивного исполнения. В то же время применение МУ одноразового срабатывания и их тенденция к усложнению являются подчас единственным способом решения целевых задач КА. Качественные методы анализа надежности, такие как, например, анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО), в данном случае малопригодны, поскольку показатели категории тяжести последствий отказов и критичности отказов в любом случае являются априори максимальными. Это следует из того, что отказ любого элемента МУ одноразового срабатывания приводит к потере КА либо к нарушению нормальной работы его бортовых систем. Несоизмеримость затрат на создание МУ одноразового срабатывания и последствий от ущерба в случае частичной или полной потери КА требует гарантированной безотказности их функционирования.

Особенности конструктивного исполнения МУ одноразового срабатывания. Поворотные и отделяемые МУ одноразового срабатывания по принципам конструирования и функционирования во многом схожи [4]. При этом поворотные МУ одноразового срабатывания имеют более сложную структуру взаимосвязей, позволяющую в полной мере отразить предлагаемый подход к обеспечению безотказности функционирования.

При всем многообразии конструктивных исполнений поворотных МУ одноразового срабатывания в общем случае они состоят из следующих групп устройств и конструктивных элементов:

1) собственно сами поворотные конструкции (складные части солнечных батарей, рефлекторов и пр.), которые предназначены для перемещения из стартового положения в рабочее;

2) быстроразъемные пироустройства в качестве инициаторов раскрытия поворотных конструкций;

3) разъемные средства крепления, служащие для закрепления и удержания конструкций на КА, защиты их от разрушения при наземной эксплуатации и доставке на околоземную орбиту, а также автоматического освобождения от удерживающих механических связей для последующего раскрытия поворотных конструкций в рабочее положение;

4) пружинные толкатели для начального страгивания поворотной конструкции;

5) шарнирные узлы для обеспечения относительных поворотов частей конструкций;

6) приводные устройства раскрытия, аккумулирующие и высвобождающие необходимый запас энергии для раскрытия поворотных конструкций;

7) средства, упорядочивающие движения поворотных конструкций в виде систем, синхронизирующих движения смежных частей поворотных конструкций, систем, обеспечивающих задержки раскрытия (когда любая поворотная часть конструкции не может начать движение в случае не завершенного движения каких-либо других ее частей [10]), либо их комбинаций;

8) электрические коммутации между поворотными частями конструкций, включающие средства металлизации;

9) телеметрические датчики контроля исходного и конечного положения поворотных частей конструкций;

10) фиксаторы конечного положения поворотных конструкций;

11) люфтовывбирающие устройства в шарнирных узлах для исключения неопределенности позиционирования частей конструкции в рабочем положении в пределах возмущающих факторов воздействия органов управления КА.

В процессе эксплуатации указанные группы устройств и конструктивные элементы последовательно выполняют заданные функции, соответствующие требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, при этом каждое из них может находиться в одном из трех состояний позиционирования составляющих его элементов: исходном, переходном и конечном. Соответственно, составляющие МУ одноразового срабатывания группы устройств и конструктивных элементов в стартовом положении находятся в исходном состоянии, в рабочем положении – в конечном состоянии, а при раскрытии – в переходном состоянии.

Отказы МУ одноразового срабатывания. При штатном выполнении всех требований МУ одноразового срабатывания функционируют в соответствии со своим назначением, т. е. находятся в работоспособном состоянии. Невыполнение хотя бы одного требования функционирования переводит МУ одноразового срабатывания в неработоспособное состояние. Переход из работоспособного состояния в неработоспособное состояние приводит к событию, называемому отказом [8]. Применительно к МУ одноразового срабатывания, отказом является невозможность перехода его устройств и конструктивных элементов в расчетный момент времени из исходного состояния в конечное состояние, или же несанкционированность такого перехода. Причинами отказов могут служить:

- механические разрушения и недопустимые деформации;
- возникновение дефектов в местах сопряжений;
- нарушения кинематических связей;
- разрегулировки монтажных настроек функциональных узлов;
- заклинивания в местах сопряжения подвижных элементов конструкции;
- недостаточные запасы движущих усилий и моментов и пр.

С позиций возникновения возможных отказов поворотных МУ одноразового срабатывания, связанных с нарушением работоспособности, можно выделить десять последовательных фаз жизненного цикла с момента изготовления КА до приведения его в рабочую конфигурацию на околоземной орбите:

1) сборка, монтаж и испытания МУ на заводе-изготовителе, в процессе которых возможны повреждения элементов в процессе соединения и некачественное осуществление самих соединений [11];

2) наземная транспортировка и участок полета, когда поворотные МУ находятся в сложном положении, закрепленные на КА, и являются его частью,

воспринимая внешние механические и акустические нагрузки при транспортировании;

3) разделение КА с РН, особенно когда часть разъемных средств крепления поворотных МУ размещается на отделяемых частях РН [12–13];

4) подготовка к раскрытию поворотных МУ с момента разделения КА с РН до подачи команды на срабатывание быстроразъемных пироустройств, когда поворотные МУ, продолжая оставаться в сложном положении, подвергаются тепловому воздействию солнца и холодного космоса и находятся в деформированном состоянии сжатия, растяжения, либо коробления в зависимости от положения КА относительно солнца;

5) срабатывание быстроразъемных пироустройств при подаче электрического импульса от бортовой системы управления полетом на пиропатроны быстроразъемных устройств, вследствие чего нарушаются равновесия в силовом замыкании разъемных средств крепления, и они получают возможность освобождения поворотных МУ для развертывания;

6) срабатывание разъемных средств крепления;

7) страгивание конструкций в направлении развертывания с помощью пружинных толкателей, обеспечивающих создание импульса движения в направлении раскрытия для преодоления инерционности поворотной конструкции и трения покоя в шарнирных узлах, а также сопровождение поворотной конструкции до полного кинематического освобождения от КА;

8) разворот в шарнирных узлах на заданный угол при помощи приводных устройств раскрытия и средств, упорядочивающих движения элементов конструкции;

9) фиксация в конечном положении;

10) механические колебания конструкций в результате перехода избыточной кинетической энергии движения поворотных частей в потенциальную энергию их деформаций после фиксации в конечном положении.

Требования к обеспечению безотказности функционирования МУ одноразового срабатывания. При анализе фаз жизненного цикла МУ одноразового срабатывания видно, что помимо безотказности функционирования следует выделять безотказность по прочности во 2 и 10 фазах жизненного цикла. В первом случае потеря работоспособности может быть вызвана достижением предельного состояния по функционированию, вследствие выхода параметров срабатывания за допустимые пределы, а во втором случае – достижением предельного состояния по прочности из-за недопустимых деформаций и разрушений. В данном случае модель надежности по фиктивным агрегатам позволяет рассматривать МУ одноразового срабатывания как систему последовательно соединенных фиктивных частей, находящихся в различных предельных состояниях и независимых по надежности [2], что дает возможность оценивать и исследовать безотказность функционирования МУ одноразового срабатывания независимо от безотказности по прочности.

Существующие подходы к обеспечению безотказности функционирования МУ одноразового срабатывания достигаются конструктивными приемами, в основе которых заложены укрупненные требования по проектированию конструкций и механизмов, направленные на достижение безотказного функционирования [14]. Такие требования включают:

- заданный уровень превышения движущего момента над моментом сопротивления в шарнирных узлах;
- наличие пружинных толкателей для начального срабатывания элементов конструкции;
- резервирование приводов;
- соблюдение принципов организованности и последовательности развертывания конструкций;
- сохранение несущей способности в результате воздействия нагрузок участка выведения, при динамических нагрузках раскрытия и пр.

Исходя из требований, направленных на достижение безотказного функционирования, осуществляется выбор конструктивного исполнения МУ одноразового срабатывания и установление в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации соответствующих указаний, технических характеристик и требований чертежей, регламентов по изготовлению, контролю и проверкам на всех этапах эксплуатации. Выполнение таких требований обеспечивает безотказность функционирования, а степень их выполнения подтверждается проведением приемо-сдаточных испытаний на этапе изготовления, результатами наземных экспериментальных отработок и инженерными расчетами, включающими анализы по обеспечению безотказного функционирования [14].

Развитие подхода к обеспечению безотказности функционирования МУ одноразового срабатывания. Анализ по обеспечению безотказного функционирования МУ одноразового срабатывания требует учета их работы в пределах стохастических разбросов параметров ФКП, геометрических характеристик конструкции, физико-механических свойств конструкционных и смазывающих материалов, технических характеристик приводных устройств раскрытия. Комбинации указанных параметров в реальных конструкциях определяются диапазонами их возможных изменений и носят вероятностный характер. Несмотря на это, недопустимость отказов в каждом конкретном случае исполнения МУ одноразового срабатывания обеспечивается степенью выполнения требований нормативно-технической, конструкторской и технологической документации по безотказному функционированию, а также полнотой и точностью их определения.

Задача обеспечения надежности МУ одноразового срабатывания заключается не только в том, чтобы установить требования по обеспечению безотказности функционирования, но и в том, чтобы добиться их полноты и, самое главное, чтобы эти требования нашли отражение в документообороте предприятия, были исполнены и проконтролированы. В качестве существенного следует отметить замечание специали-

стов NASA в ходе расследования причин гибели шаттла «Челленджер» о том, что важны не только подходы и методы обеспечения надежности, но и то, как их применять [15].

Гарантий достижения безотказности функционирования МУ одноразового срабатывания позволяет добиться подход, основанный на процедурах, направленных на выявление полного перечня критичных элементов, установления требований документации по безотказному функционированию для каждого критичного элемента и формализованного подтверждения фактов отражения этих требований в документации при помощи соответствующего анализа.

Реализацию такого подхода к обеспечению безотказности функционирования МУ одноразового срабатывания предлагается осуществлять с помощью следующего перечня и состава процедур.

1. Каждое из групп устройств и конструктивных элементов, составляющих МУ одноразового срабатывания, подвергается анализу, при котором производится декомпозиция по элементам, выявление видов отказов, определение критических отказов и критичных элементов согласно ГОСТ 27.310–95 [16].

2. Для каждого критичного элемента моделируются и определяются условия его безотказного функционирования с учетом фаз жизненного цикла (наличие свободы вращений; определение диапазонов тепловых ограничений; регламентирование усилий или зазоров в соединениях; задание избыточности движущих усилий и моментов; обеспечение беспрепятственности, управляемости и предсказуемости движений; недопущение соударений и зацеплений со смежными конструкциями и пр.).

3. Для выполнения каждого из условий безотказного функционирования критичного элемента устанавливаются конструктивные требования в документации по его исполнению (обеспеченность минимально необходимыми зазорами в сопряжениях; гарантированность снятия ограничений по тепловым деформациям; последовательность наложения и снятия механических связей в разъемных соединениях; достаточность избыточных усилий или моментов для обеспечения раскрытия; обеспеченность пределов регулировок для устранения погрешностей сборки, связанных с изменением взаимного положения собираемых деталей из-за отклонений формы сопрягаемых поверхностей, деформации сопрягаемых деталей, неточной установки и фиксации деталей и узлов и пр.).

4. Отражение каждого требования в документации для всех критичных элементов проверяется путем экспертизы нормативно-технической, конструкторской и технологической документации. Результаты анализа экспертизы формализуются в виде протокола в «бинарной» форме: цифра «1» означает, что требование учтено в документации, «0» – нет.

Указанный анализ считается успешно проведенным, если в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации формально отражены требования по безотказному функционированию каждого критичного элемента. В случае отсут-

ствия отражения в документации хотя бы одного требования организуются мероприятия по ее доработке и дополнительному подтверждению выполнения соответствующего требования в реальной конструкции.

Указанный подход не затрагивает объема и содержания традиционных мероприятий согласно программе обеспечения надежности (ПОН). Он лишь предусматривает установление требований по безотказному функционированию для каждого устройства и конструктивного элемента МУ одноразового срабатывания на этапе проектирования и обязательный контроль по отражению этих требований в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации путем проведения соответствующего анализа. Составление протокола формальных требований по безотказности функционирования на основании вышеизложенного подхода является ключевым мероприятием по обеспечению надежности МУ одноразового срабатывания.

В результате указанного подхода уменьшается вероятность нарушения работоспособности МУ одноразового срабатывания из-за конструктивных недоработок, конструкторских ошибок, дефектов и ошибок при реализации технологий изготовления, сборки, монтажа и контроля качества, чем обеспечивается безотказность функционирования МУ.

Библиографические ссылки

1. Космические аппараты связи и навигации Научно-производственного объединения прикладной механики на пороге XXI века / А. Г. Козлов, В. А. Бартнев, А. В. Ромашко и др. // Решетневские чтения : материалы III Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 1999, г. Красноярск) ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1999. С. 25–44.
2. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов / А. А. Кузнецов [и др.]. М. : Машиностроение, 1979.
3. Диняева Н. С. Конструирование механизмов антенн : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2002.
4. Шатров А. К., Назарова Л. П., Машуков А. В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006.
5. Теория проектирования сложных технических систем космического базирования : учебник / М. К. Сапего [и др.]. СПб., 2012.
6. RFP № 196. Запрос на предложение по третьему поколению космического сегмента ИНМАРСАТ ; ред. от 02.10.1989. Ч. 4. Р. 10. Механизмы. С. 91.
7. Максимов И. А. Проблемы обеспечения надежного функционирования современных космических аппаратов в условиях дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства и факторов техногенного характера // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 100–101.
8. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 2002.
9. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Оценка и прогнозирование показателей надежности и технического состояния КА длительного функционирования при орбитальном полете // Решетневские чтения : материалы VII Междунар. науч. конф. (10–13 ноября 2003, г. Красноярск) ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2003. С. 21–22.
10. Способ разворачивания многосекционных конструкций и многосекционная конструкция для его реализации : пат. 2123875 Рос. Федерации. МПК В64G 1/44 / Ю. П. Похабов, В. В. Лесихин. № 93010565/23 ; заявл. 01.03.1993 ; опубл. 27.12.1998.
11. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. С. 61.
12. Способ удержания объектов и устройство для его реализации : пат. 2130880 Рос. Федерации. МПК В64G 1/22, 1/44 / В. В. Лесихин, Ю. П. Похабов, В. И. Халиманович, А. В. Томчук. № 93010565/28 ; заявл. 01.03.1993 ; опубл. 27.05.1999, Бюл. № 15.
13. Летательный аппарат : пат. 2198117 Рос. Федерации. МПК В64G 1/00 1/44 / Ю. П. Похабов, В. Н. Наговицин, В. В. Лесихин и др. № 99102342/28 ; заявл. 08.02.1999 ; опубл. 10.02.2003, Бюл. № 4.
14. Машуков А. В., Шатров А. К. Подходы к формированию требований по надежности крупногабаритных рефлекторов при раскрытии на орбите // Решетневские чтения : материалы IX Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2005, г. Красноярск) / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. С. 49–50.
15. Лернер Э. Дж. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. 1987. № 9. С. 157–160.
16. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. М. : Изд-во стандартов, 2002.

Yu. P. Pokhabov

DISTINCTIVE FEATURES OF MAINTENANCE OF FLAWLESSNESS OF NONREUSABLE MECHANICAL DEVICES FUNCTIONING ON SPACE VEHICLES

One of approaches to maintenance of flawlessness of nonreusable mechanical devices functioning on space vehicles, is considered. The list of procedures on realization of the specified approach is presented.

Keywords: space vehicle, failure-free, nonreusable mechanical devices, functioning.

© Похабов Ю. П., 2012