

## АНАЛИЗ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В США, ЕС И РФ

Н.Ю. Введенский, М.В. Пустобаев  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Представлен анализ нормативной документации и практики ведущих иностранных институтов США (Министерство обороны США, NASA) и ЕС (ESA) в области экспериментальной отработки космической техники на механические воздействия. Проведено сопоставление зарубежного и отечественного опыта отработки, выявлены существенные различия в терминологии и методологии испытаний. Описаны активно применяемые за рубежом альтернативные подходы к отработке прочности, позволяющие снизить затраты на отработку путём совмещения квалификационных/зачётных и приёмочных испытаний изделий.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, нормативная документация, конструкторско-отрабочные испытания, конструкторско-доводочные испытания, предварительные испытания, приёмо-сдаточные испытания, альтернативные стратегии, протофлайт.

### Введение

Для повышения качества продукции космической отрасли нормативная документация (НД) в области разработки и производства изделий космической техники должна быть актуальной и соответствовать международным стандартам. В том числе в области отработки стойкости космической техники к механическим воздействиям.

Вследствие этого, а также в связи с использованием зарубежного оборудования и элементной базы в составе отечественных КА, необходимо изучить зарубежные стандарты в области отработки прочности конструкции и бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА) для того, чтобы:

- подтверждать соответствие аппаратуры сторонних разработчиков требованиям по нагрузкам, предъявляемым при эксплуатации в составе ракеты-носителя (РН);

- увязать требования к БА КА с требованиями, предъявляемыми к конструкции КА, в том числе предъявлять более обоснованные требования к испытаниям БА, снижать коэффициенты запаса;

- использовать современные расчётно-экспериментальные методики сокращения объёма механических испытаний конструкции и БА КА, в том числе использовать альтернативные стратегии отработки (объединение разных категорий испытаний), вплоть до полного отказа от проведения испытаний;

- улучшить методику регистрации истории нагружения изделия при испытаниях и транспортировании на протяжении всего цикла отработки.

В данной статье проводится обзор стандартов и практики США и ЕС в области отработки изделий на механические воздействия. Сравниваются зарубежный и отечественный подходы к отработке с

целью выявления существующих различий, а также сформулированы предложения по улучшению отечественной НД. При этом существенным является то, что за рубежом НД носит рекомендательный характер, а в РФ ГОСТ и ОСТ носят обязательный характер, отклонение от них сложно реализовать, и требуется тщательное обоснование и согласование.

Для сравнения выбраны:

- требования по проведению определённых видов испытаний (например вибрационные) при различных категориях испытаний (например приёмочные, зачётные/отрабочные);

- отличия в проведении соответствующих категорий испытаний;

- наличие и особенности альтернативных стратегий проведения испытаний изделий (методы совмещения квалификационных/зачётных и приёмочных испытаний изделий для снижения затрат на экспериментальную отработку).

### Особенности зарубежной нормативной документации и отличия в терминологии

Для анализа зарубежного подхода к отработке прочности необходимо установить различия в терминологии и структуре построения системы отработки. Наиболее важным является разбиение изделия на части и классификация категорий испытаний (табл. 1).

Классификация разбиения изделия на составные части за рубежом следующая [1]:

- КА в целом;

- подсистемы;

- оборудование (или компоненты);

- .... (более мелкие части не представляют интереса с точки зрения отработки на механические воздействия).

Таблица 1

Зарубежная классификация (по MIL-STD-1540С)	Отечественная классификация (по ГОСТ 16504-81, ОСТ 92-5100-2002, ряд военных ГОСТ и др.)
Разработочные (development)	Конструкторско-доводочные
Приёмочные (acceptance)	Контрольно-технологические, предъявительские и приёмо-сдаточные. Иногда встречается термин «приёмочные»
Квалификационные (qualification)	Зачётные или отработочные, иногда употребляется термин «предварительные»

Таблица 2

Вид испытаний	РФ	За рубежом
Испытания на действие ударных нагрузок	R	R
Акустические	—	R <sup>1</sup>
Вибрационные, случайные (ШСВ)	R	R <sup>1</sup>
Вибрационные, синусоидальные	R	R
Статические	R	R
Модальные испытания	O	R

П р и м е ч а н и я. Для небольших КА проводится или случайная вибрация или акустика, для больших – только акустика; низкочастотная синусоидальная вибрация обязательна. Обозначения: «R» – требуется, «O» – необязательное, «—» – не требуется.

За рубежом основная силовая конструкция считается подсистемой и не включает силовые элементы оборудования (в отличие от отечественной практики). В зарубежном понимании, например, к оборудованию относятся антенны, солнечные батареи, баллоны, трубопроводы и другие элементы пневмогидросхемы, манипуляторы.

#### Нормативная документация США, ЕС и РФ

В работе анализируются следующие зарубежные стандарты: *Военный стандарт США MIL-STD-1540С* (описывает комплексный подход к испытаниям изделий космической техники и содержит требования, предъявляемые в МО США к наземным испытаниям РН, РБ, КА, их подсистем и блоков на воздействие к механическим и другим внешним воздействующим факторам); *стандарты ЕС*:

– ECSS-E-10-03А (содержит требования к функциональным испытаниям и испытаниям на воздействие внешней среды космических систем и их составляющих);

– ECSS-E-ST-10-02С (определяет основную концепцию процесса отработки, критерии для установления стратегии отработки и уточняет требования, которые должны содержаться в программе испытаний);

– ECSS-E-ST-32-10С (определяет коэффициенты безопасности (factors of safety), коэффициент безопасности при проектировании (design factor) и другие дополнительные коэффициенты, используемые для выбора толщин и отработки конструкции КА, включая квалификационные и приёмочные испытания);

– ECSS-E-ST-32-11С (определяет базовые требования, предъявляемые к проведению и оценке модальных испытаний космических изделий);

– ECSS-E-ST-32С (определяет требования к проектированию конструкций, уточняет, какие требования должны учитываться при всех стадиях проектирования);

– ECSS-E-ST-33-01С (определяет требования к конструкции, расчётам, доработке, производству, экспериментальной отработке, функционированию на орбите механизмов КА и полезной нагрузки);

– ECSS-Q-ST-70-46С (определяет требования к производству, обеспечению, инспекциям и контролю качества высококачественных резьбовых крепежных деталей (болты, гайки, шпильки и шурупы), используемых в КА.

Стандартами РФ, с которыми будет проводиться сравнение, являются ГОСТ 16504-81, ОСТ 92-5100-2002, ряд военных ГОСТ (ГОСТ РВ 50699, ГОСТ РВ серии 20.39, серии 20.57).

#### Особенности зарубежной экспериментальной отработки на действие режимов механического нагружения при зачётных испытаниях по сравнению с отечественной отработкой

Сравнение требований к видам и объёмам квалификационных/зачётных испытаний (MIL STD-1540, ГОСТ 16504-81, ОСТ 92-5100-2002, ряд военных ГОСТ (ГОСТ РВ 50699, ГОСТ РВ серии 20.39, серии 20.57)) представлено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, за рубежом на уровне КА проведение ШСВ, в основном, не является обязательным, проведение модальных испытаний является обязательным.

В соответствии с требованиями МО США отработка КА ведётся только акустическими испытаниями, а ШСВ применяется на уровне оборудования. Акустические испытания могут быть заменены на ШСВ для малых КА с массой не более 180 кг. При этом баллоны и компоненты, работающие под дав-

лением (трубки, штуцера, клапаны и т. п.), антенны, другие навесные элементы или отдельные элементы конструкции относятся к оборудованию, т. е. проходят виброиспытания либо автономно, либо в каких-либо специальных сборках.

При этом на практике конструкция КА часто подвергается виброиспытаниям в качестве оснастки для оборудования. В последнее время в США имеется тенденция отрабатывать оборудование и конструкцию на уровне КА [2], в этом случае автономная виброобработка исключается. Обычно это не относится к элементам систем, работающих под давлением. Однако и в отношении таких элементов наблюдается тенденция к проведению только акустических испытаний: последний проект стандарта NASA и МО США MIL-STD-1522A по системам, работающим под давлением, содержал требование только по проведению акустических испытаний. КА «Иридиум» фирмы «Motorola» не проходил виброиспытания (испытания на давление элементов ПГС в любом случае являются обязательными).

Например в соответствии с требованиями к обработке элементов американского сегмента международной космической станции (МКС) [3, 4] на уровне модулей должны проводиться акустические испытания, которые могут быть заменены на случайную вибрацию, однако в перечне многочисленных принятых отступлений ни одной такой замены нет, зато имеется шесть решений отказать от проведения акустических испытаний вообще без всякой альтернативы. На уровне оборудования МКС испытания на акустику и случайную вибрацию взаимозаменяемы, при этом для оборудования с большими площадями (антенны, солнечные батареи) акустика считалась предпочтительной. Синусоидальная вибрация не является обязательной даже для оборудования.

#### **Особенности зарубежной экспериментальной обработки на действие режимов механического нагружения при испытаниях лётных образцов (приёмочные, приёмо-сдаточные и т. п.) по сравнению с обработкой в РФ**

Сравнение требований к видам и объёмам приёмочных испытаний (MIL STD-1540, ГОСТ 16504-81, ОСТ 92-5100-2002, ряд военных ГОСТ (ГОСТ РВ 50699, ГОСТ РВ серии 20.39, серии 20.57)) представлено в табл. 3.

Как видно из табл. 3, зарубежный опыт обработки при приёмочных испытаниях отличается от отечественного следующим:

– в части виброобработки: в то время как в РФ требования к виброобработке и акустическим испытаниям

Таблица 3

Вид испытаний	РФ	За рубежом
Акустические	–	$R^1$
Вибрационные	–	$R^1$
Обтяжки (статические)	$O$	$O^2$
Опрессовки (для конструкций под давлением)	$R$	$R$
Испытания на действие ударных нагрузок	–	$O^3$
Модальные испытания	–	$R$

Примечания. Для небольшихборок проводится или вибрация или акустика, для больших – только акустика, синусоидальная вибрация обязательна. Для композиционных конструкций обязательны, если это устанавливается при формировании конкретной программы испытаний. Обозначения: « $R$ » – требуется, « $O$ » – необязательное, «–» – не требуется.

не предъявляются, в зарубежной практике дляборок небольшого размера проводится или ШСВ или акустические испытания, для больших только акустика; низкочастотная синусоидальная вибрация обязательна;

– обтяжки являются необязательными даже для композиционных конструкций (для остальных типов конструкций обтяжка не требуется), в то время как в отечественной практике не сформулированы требования о необходимости проведения испытаний на обтяжку;

– требуется проведение испытаний на воздействие ударных нагрузок, если это устанавливается при формировании конкретной программы испытаний;

– требуется проведение модальных испытаний.

#### **Режимы нагружения и особенности расчётного анализа за рубежом**

**Режимы механического нагружения.** За рубежом [1] имеется чёткое разделение режимов на два уровня: приёмочный и квалификационный. Приёмочный понимается как максимально ожидаемый в эксплуатации, а квалификационный определяется по отношению к приёмочному через квалификационный запас (добавку) в децибелах. Также возможно определение значений обеих уровней, исходя из определённой доверительной вероятности (для квалификационных, как правило, 0,9, для приёмочных – 0,5) не превышения данных уровней нагрузок в 99% (95%, 50%) случаях выведения КА [5]. Такой подход используется, например, в МО США для обеспечения возможности снижения квалификационного запаса.

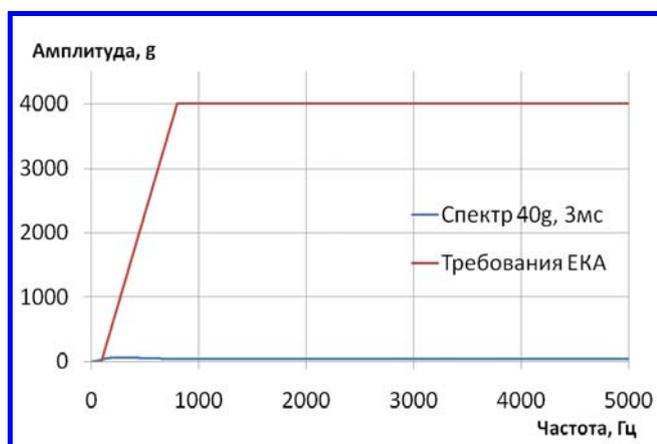
**Вибрация.** Режимы синусоидальной вибрации КА обычно определяются по данным расчёта нагрузок при переходных процессах с преобразо-

ванием результатов к эквивалентным гармоническим уровням, либо под ней понимаются действительно узкополосные процессы, обусловленные, например, вращающимися элементами.

Режимы случайной вибрации при отработке за рубежом обоснованы и опираются на данные телеизмерений. В высокочастотной области для оборудования вводится дополнительная добавка для проверки качества производства. Значения уровней случайных вибраций зависят от веса оборудования.

Основные рекомендации по испытаниям на вибрацию заключаются в длительности испытаний (3 мин для оборудования и 2 мин для КА, куда входит и имитация транспортирования). Это достигается форсированием режимов по уровню к максимальным полётным значениям и соответствующим сокращением длительности, при этом следует учитывать, что в процессе полёта уровни воздействий значительно меняются. В отечественной практике испытания на транспортирование длятся часами.

**Ударные испытания.** Режимы испытаний на ударные воздействия за рубежом задаются иначе, чем в РФ. В МО США чётко установлены временные границы ударных нагрузок: это процессы, затухающие за 5 – 15 мс, при этом нижняя граница частоты обычно составляет 100 Гц. В РФ же часто «смешивают» испытания на низкочастотную случайную вибрацию и одиночные удары [6, 7, ряд военных ГОСТ]. При этом, если для зарубежных стандартов характерно повсеместное использование спектра удара (ответа) как характеристики ударного воздействия, то в российских ГОСТ и ОСТ (в том числе ГОСТ РВ серии 20.39), в основном, предъявляются требования в виде стойкости к определённому импульсному удару, характеризуемому амплитудой и длительностью импульса.



Спектр удара амплитудой 40г, длительностью 3 мс, и требования по спектру удара, предъявляемые в ЕКА [8]

Типичные для отечественной практики уровни испытаний импульсом с амплитудой 40g/150g и длительностью ~3 мс существенно перегружают БА в низкочастотной области и недогружают в высокочастотной, т. е. не воспроизводят адекватное значение нагрузок. На рисунке представлено сравнение требований ЕКА по спектру удара и спектр от воздействия импульса амплитудой 40g и длительностью 3 мс.

Помимо этого, сам критерий испытаний на импульсное воздействие, которому соответствует определённый спектр удара, является неудобным при моделировании нагрузок от пиросредств, обладающих высоким значением спектра в широком частотном диапазоне.

Необходимо отметить, что перекрытие действительного спектра удара от пиросредств одиночным импульсом стандартной (полусинусоидальной, треугольной или иной) формы без создания значительных перегрузок невозможно. Помимо этого у данного способа существуют ограничения по массе объекта испытаний, используемому оборудованию и др.

Коэффициенты запаса при квалификационных испытаниях (квалификационные запасы) в США колеблются от 3 до 6 дБ, при этом (как альтернатива запасам по уровням нагружения) длительность нагружения при зачётных испытаниях или число ударов принимается в два-четыре раза выше максимальных эксплуатационных значений, что и является различием уровней приёмочных и зачётных испытаний. При отработке на срабатывание пиросредств с помощью непосредственного срабатывания обычно используются штатные пиросредства, при этом многократное срабатывание позволяет получить вероятностные оценки режимов.

### Особенности проведения расчётного анализа.

За рубежом расчётный анализ проводится более тщательно, чем в РФ. Помимо расчётов статической прочности, проводятся следующие расчёты, которые не проводятся в РФ:

- оценка усталости от действия всех нагрузок и режимов механического нагружения вплоть до узлов крепления;
- анализ безопасного срока существования с использованием критериев механики разрушения (в основном для систем, работающих под давлением).

При этом под расчётом на действие режимов (за исключением пиротехники вблизи мест её установки) подразумевается проведение динамических расчётов для КА в целом для обеспечения определения нагрузок и циклограмм нагружения на узлы

и оборудование. Проектные запасы, используемые при расчётном анализе, не ниже квалификационных, и, как правило, равны им в случае обычной системы отработки.

Проверка по пределу текучести (для металлических материалов) общепринята, при этом соответствующий коэффициент безопасности 1,0 – 1,1.

При расчётах нагрузок за рубежом используются коэффициенты неопределённости, являющиеся множителями на величины нагрузок. С уточнением динамической модели (последний этап уточнения – проведение обязательных модальных испытаний) значения данных коэффициентов уменьшаются. В РФ коэффициенты неопределённости используются, но, как правило, не уменьшаются.

За рубежом требования к точности согласования параметров расчётной модели и результатов модальных испытаний очень высоки. При этом в отличие от отечественной практики (где модальные испытания проводятся для оценки резонансных частот, форм колебаний, параметров демпфирования и в целом для верификации моделей), одна из основных целей модальных испытаний за рубежом – это подтверждение динамической модели для расчётов нагрузок на участке выведения. Тем не менее, начальные значения толщин выбираются при значении коэффициента 1,5, и при дальнейшем снижении коэффициента не происходит существенного изменения значения параметров.

**Альтернативные подходы к отработке за рубежом.** При использовании традиционного подхода к отработке прочности образцы конструкции или БА, прошедшие зачётные испытания, считаются непригодными для лётной эксплуатации, поскольку неизвестна остаточная прочность. Однако изготовление отдельных образцов БА или макетов конструкций для проведения зачётных испытаний не всегда возможно, поэтому за рубежом используются альтернативные процедуры, которые позволяют снизить количество используемых образцов при испытаниях: стратегии испытаний, которые в отдельности или в комбинациях могут использоваться при отработке.

При этом признается, что применение альтернативных подходов ведёт к большому риску по сравнению с традиционной процедурой, когда лётный образец проходит приёмочные испытания, а квалификационные запасы продемонстрированы на отдельном образце при зачётных испытаниях. Увеличение риска при использовании альтернативных стратегий может быть частично компенсировано за

счёт более тщательного проведения конструкторско-доводочных (в зарубежной терминологии разработочных) испытаний или увеличения их объёма, а также за счёт увеличения проектных коэффициентов безопасности.

Альтернативные подходы могут использоваться на различных уровнях комплектации: аппарат в целом, его подсистемы или оборудование.

При стратегии резервирования [1, 2, 9] образец, прошедший зачётные испытания, может быть допущен к лётной эксплуатации, если риск такого решения минимизируется. После окончания зачётных испытаний с испытанного изделия могут быть снято отдельное критичное оборудование (применительно к отечественным условиям это скорее габаритно-весовые макеты, а не штатное оборудование) и, если необходимо, проведены ремонтно-восстановительные работы. Прошедшее ремонтно-восстановительные работы изделие допускается к лётной эксплуатации при условии успешного прохождения приёмочных испытаний на уровне укомплектованного изделия в целом.

При использовании стратегии без зачётных испытаний [1, 2, 9] все лётные образцы подвергаются приёмочным испытаниям с повышенными уровнями воздействий, однако зачётные испытания не проводятся вообще. При этом имеется риск того, что из-за отсутствия обычной демонстрации квалификационных запасов оставшийся ресурс конструкции может быть недостаточен. Длительность нагружения приёмочных испытаний принимается как обычно.

При стратегии «протоквалификации» [1, 2, 9] первое лётное изделие подвергается зачётным испытаниям с некоторыми изменениями, а остальные изделия проходят обычные приёмочные испытания.

В зависимости от особенностей изделий и программ запусков могут использоваться различные комбинации стратегий. Например для одного и того же изделия на уровне оборудования может применяться стратегия «протоквалификация», а на уровне КА в целом стратегия «без зачётных испытаний». Или, например, для программ, включающих всего один запуск, для отдельного оборудования может применяться стратегия «без зачётных испытаний», а для программ с несколькими запусками в части отдельного оборудования может применяться стратегия «протоквалификация».

При применении стратегии «протофлайт» [1, 2, 9] оборудование или сборки, проходящие зачётные испытания, используются для полёта. В связи с этим программы зачётных испытаний содержат пониженные уровни нагрузок. Последующие лётные компоненты

или их сборки должны подвергаться одинаковым испытаниям типа «протофлайт» каждые.

Приёмка прошедших испытания типа «протофлайт» компонентов проводится на основе анализа фактически израсходованного ресурса, что позволяет определить нужен ли восстановительный ремонт. Стратегия «протофлайт» использовалась для отработки американского сегмента МКС [3, 4]. В случае существенных доработок или большого количества компонентов, подвергнутых восстановительному ремонту или заменённых, проводились также обычные приёмочные испытания.

**Идеология принятия решения об отказе от испытаний в NASA [9].** В последние 20 лет в NASA от случая к случаю принимаются решения об отказе от испытаний. Основания для данных решений:

- развитие методов анализа конструкций, что гарантирует получение более надёжных результатов, особенно в случаях нелинейного поведения конструкции, сложной геометрии или сложного распределения внутренних усилий;

- наличие и широкое распространение надёжного программного обеспечения (NASTRAN, ANSYS и т. п.);

- возросшая стоимость испытаний и возросший риск разрушения при использовании подхода типа «протофлайт» с точки зрения безопасности и стоимости ремонта;

- лабораторные испытания больших гибких навесных элементов в орбитальной конфигурации сложны или их невозможно провести корректно;

- относительная дешевизна расчёта по сравнению с испытаниями.

Решения об отказе от испытаний за рубежом принимаются в каждом конкретном случае на основе детального анализа. Критерии для принятия решения не являются определёнными и фиксированными. Как правило, при отказе от испытаний должны использоваться повышенные коэффициенты безопасности, но само по себе это не является основанием для принятия решения. Каждый раз подготавливается соответствующее обоснование, и решение согласуется с заказчиком. Вместе с тем, существуют некоторые рекомендательные критерии:

- конструкция простая (например статически определимая), распределение нагрузок на подконструкции простое, и оно полностью промоделировано и проанализировано для всех случаев нагружения и комбинаций нагрузок, имеется большая уверенность в обоснованности нагрузок;

- конструкция аналогична в части общей конфигурации, конструктивных особенностей и комбинаций нагрузок ранее успешно испытанной конструкции при хорошем соответствии результатов измерений и расчётов;

- были проведены успешные конструкторско-доводочные испытания или испытания отдельных элементов, которые считаются трудными для анализа, при этом результаты испытаний и расчётов хорошо коррелируются.

В РФ решения об отказе от механических испытаний, как правило, принимаются только при наличии опыта испытаний и/или эксплуатации аналогичных изделий, при демонстрации запаса по статической прочности в 2 раза.

### Выводы

Отработка космической техники в США и ЕС по сравнению с РФ отличается следующим:

- классификацией разбиения КА на уровни сборок с точки зрения отнесения различных элементов к конструкции: значительная часть конструкции в отечественном понимании (БФ, антенны и др.) за рубежом относится к оборудованию;

- более глубоким расчётным анализом прочности, системой отработки, которая включает гораздо больший объём приёмочных (контрольных технологических) испытаний, в то же время контрольно-выборочные испытания практически отсутствуют;

- опытом проведения приёмочных прочностных испытаний лётных образцов как силовой конструкции, так и навесного оборудования (при этом экспериментальная база соответствует всем предъявляемым требованиям);

- проведения виброиспытаний больших КА в сборе не требуется, они проводятся только с целью отработки оборудования, а не силовой конструкции КА, либо взамен акустических испытаний для отработки оборудования в зарубежном понимании;

- хорошо обоснованными режимами испытаний на механические воздействия по данным телеметрической информации на основе статистических оценок, расчётов отклика оборудования на внешние механические воздействия и анализа связанных нагрузок при переходных процессах; чётко различаются уровни и длительность (число ударных воздействий) для зачётных испытаний и приёмочных испытаний. Режимы уточняются после обязательных модельных испытаний.

В целях экономии средств за рубежом применяются альтернативные подходы к отработке прочности, ведущие к повышению риска, при этом

применяются повышенные запасы прочности. Решения об отказе от испытаний принимаются в конкретных случаях, однако необходимо наличие проведённых ранее успешных испытаний с аналогичными конструкциями и демонстрация хорошего соответствия расчётных и экспериментальных результатов.

Нормативная документация США и ЕС и отработка КА на механические воздействия больше соответствует современному подходу к проектированию и испытаниям, чем в РФ. За рубежом широко применяются расчётные методы, модальный анализ, более обоснованы значения нагрузок, применяются альтернативные стратегии отработки, что в итоге позволяет повысить качество отработки и минимизировать затраты, в том числе и путём отказа от испытаний, который в РФ встречается намного реже.

Для повышения качества отработки изделий космической техники в РФ, оптимизации сроков и стоимости отработки необходимо совершенствование отечественной НД и приведение её в соответствие с современными зарубежными и международными стандартами.

По мнению авторов, нуждаются в корректировке следующие стандарты: ГОСТ 16504-81 (испытания), ГОСТ РВ 20.39.301-98, ГОСТ РВ 20.39.304-98, ГОСТ РВ 20.57.305-98, ГОСТ В 24880-81, ОСТ 92-5100-2002, ГОСТ РВ 15.201-2003, ГОСТ РВ 15.211-2002, ГОСТ РВ 15.307-2002, ГОСТ В 22571, ГОСТ В 22619-90, ГОСТ РВ 50699-94, ГОСТ В 22619-90, ГОСТ РВ 50674-94, ГОСТ В 15210. Рекомендуется в них внести следующие изменения:

- объединить испытания на механические воздействия лётных образцов (предъявительские, ПСИ) в одну группу (например ПСИ);

- установить единое название для испытаний на механические воздействия опытных, аналогичных лётным, образцов, проводимых на режимы ПСИ, умноженные на коэффициенты квалификации/запаса (в разной отечественной НД такие испытания называются КДИ, ЛОИ, КОИ, предварительные, зачётные). Например назвать их «зачётными». При этом предполагается, что объект зачётных испытаний изготовлен по КД лётного образца, которая далее может лишь незначительно корректироваться в крайних, оговоренных случаях, при этом такая корректировка КД является нежелательной;

- установить определённые критерии различия категорий испытаний в виде коэффициентов квалификации (запаса), причём базовым уровнем

должны служить уровни ПСИ, относительно которых будут устанавливаться коэффициенты квалификации; установить алгоритм снижения коэффициентов запаса через надёжность и вероятность безотказной работы (статистические методы).

- разработать процедуры совмещения зачётных испытаний и ПСИ в альтернативные стратегии по аналогии с практикой зарубежных стран.

Внесение изменений может проводиться не только путём корректировки ГОСТ, ОСТ и внедрения их «сверху вниз», но и путём создания документации на уровне предприятий (СТП, СТО).

По мнению авторов, созданные на предприятиях стандарты (СТП, СТО) помогли бы:

- организовать процесс разработки конструкции КА в тесном взаимодействии с прочностными расчётами для повышения эффективности расчётно-экспериментального подтверждения прочности конструкции и БА КА, в крайнем случае, позволяющий обоснованно отказаться от испытаний;

- уточнить программу приёмочных испытаний КА, подсистем и блоков, с обязательным включением модальных испытаний, установить критерии для проведения вибрационной и акустической отработки;

- предусмотреть на всех этапах жизненного цикла образца (изделия) сохранение копий протоколов всех механических испытаний и их обязательное наличие у любого образца как у покупаемой аппаратуры, так и у создаваемой на предприятии;

- привести требования к подтверждению ударной стойкости конструкции и БА КА в соответствии с международной практикой: задавать нагрузки в виде спектра удара. Возможно также создать требования по максимальному спектру для БА (как в ЕКА, 4000g), которые охватят спектр всех (или подавляющего большинства) используемых пиросредств, и снимут необходимость задания и уточнения ударных нагрузок для каждого КА в случае использования на нём такой БА.

Основным преимуществом создания СТП (СТО) по сравнению с изменением ГОСТ/ОСТ, помимо меньшей трудоёмкости процесса согласования, является более узкая направленность документа: регламентируется деятельность предприятия в области создания и отработки прочности конкретной продукции, что позволяет более детально проработать эти аспекты.

*Статья публикуется после смерти одного из соавторов, лауреата Премии Правительства РФ 1996 г. в области науки и техники, канд. физ.-мат. наук Николая Юрьевича Введенского.*

### Литература

1. MIL-STD-1540C. Test Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicles.
2. ISTS 94-b-01. M.C. Low, C.E. Lifer. Recent Developments in Structural Verification of Spacecraft.
3. SSP 30559, Rev. B. ISS. Structural Design and Verification Requirements.
4. SSP 41172B. ISS. Qualification and Acceptance Environment Test Requirements.
5. NASA-STD-5001. Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware.
6. ОСТ 92-5100-2002. Аппаратура космических комплексов. Общие технические условия. – Взамен ОСТ 92-5100-89; вступил в действие с 01.07.2003. – М. : Российским авиационно-космическим агентством, 2002. – 174 с.
7. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16504-74; вступил в действие с 01.01.1982. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 24 с.
8. [http://www.ruag.com/de/Space/Products/Launcher\\_Structures\\_Separation\\_Systems/Adapters\\_Separation\\_Systems/payload\\_adapter\\_systems](http://www.ruag.com/de/Space/Products/Launcher_Structures_Separation_Systems/Adapters_Separation_Systems/payload_adapter_systems).
9. NASA-STD-5002. Loads Analysis of Spacecraft and Payloads.

Поступила в редакцию 30.10.2012

*Николай Юрьевич Введенский, канд. физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник.  
Михаил Викторович Пустобаев, аспирант, млад. научн. сотрудник.  
E-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com, т. (495) 366-79-52.*