

РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ СБОРОК КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ НА СТОЙКОСТЬ К ПИРОТЕХНИЧЕСКИМ УДАРАМ

Е.А. Канунникова,
М.В. Пустобаев,
А.Д. Судомоев, А.П. Тютнев
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлены две типовые методики подтверждения стойкости к ударным нагрузкам от пиротехнических средств с использованием разработанных источников ударного нагружения. Первая методика описывает испытания на ударную стойкость опытныхборок космического аппарата, вторая – автономные испытания бортовой аппаратуры на созданном специализированном стенде.

Ключевые слова: испытания, автономные испытания, пиротехнические устройства, удар, стойкость, космический аппарат, опытная сборка.

Космический аппарат (КА) и входящие в его состав приборы и антенны при выведении КА на орбиту и раскрытии трансформируемых конструкций КА подвергаются воздействию механических внешних факторов, одним из которых являются ударные нагрузки от срабатывания пиротехнических систем разделения (СР). Для подтверждения стойкости элементов КА к ударным нагрузкам в соответствии с требованиями нормативной документации проводится полный объём их наземной отработки.

При проведении функциональных испытаний на работоспособность штатных пиротехнических СР на динамическом макете (ДМ) КА, оснащённом макетами аппаратуры и антенно-фидерных устройств радиолинии целевой информации (АФУ РЛЦИ), на элементы конструкции и оборудование КА действуют виброударные нагрузки, которые соответствуют эксплуатационным.

Подобные испытания одновременно являются как функциональными (для отработки СР), так и приёмосдаточными (ПСИ) для подтверждения виброударной стойкости КА. Если оборудование КА при автономных испытаниях не проходило виброударные испытания при режимах нагружения, учитывающих коэффициент безопасности, то при ПСИ опытныхборок КА отработка виброударной стойкости конструкции и оборудования в соответствии с требованиями норм прочности будет недостаточно полной.

В этой связи для отработки на воздействие ударных нагрузок от пиротехнических средств с учётом коэффициента безопасности разработана типовая методика автономных испытаний опытныхборок КА с использованием разработанных пиротехнических устройств нагружения – стендовых и мобильных пироударников (СПУ и МПУ).

В случае если использование сборки КА как оснастки для отработки стойкости оборудования на пироударные нагрузки невозможно или нецелесообразно, следует проводить автономные испытания бортовой аппаратуры (БА) на специализированном стенде.

В настоящей статье изложены типовые методики испытаний опытной сборки КА и автономных испытаний БА на стойкость к ударным нагрузкам от срабатывания пиросредств.

Типовая методика испытаний опытныхборок КА

В качестве оснастки при испытаниях на ударную стойкость элементов и оборудования КА при действии ударных нагрузок от пиротехнических СР используется натурная конструкция КА или динамический макет.

В этом случае для определения режимов испытаний требуется априорная информация о виброударных нагрузках на КА при срабатывании штатных пиротехнических СР. Эти данные можно получить при проведении функциональных испытаний СР или же использовать нормы прочности по ударным нагрузкам.

В отличие от стендовых испытаний, где требуется предварительная настройка частотных характеристик системы стенд/объект испытаний, для опытныхборок КА при локальном импульсном нагружении от виброударных устройств собственные частоты практически совпадают с частотами силового корпуса натурной конструкции КА. Поэтому при испытаниях опытныхборок КА основной задачей при моделировании режима нагружения в форме спектра удара (СУ) является создание расчётных амплитуд СУ для основных собствен-

ных частот сборки. В качестве основной характерной частоты спектра выступает точка, соответствующая экстремальному значению СУ, которую можно определить по СУ измеренного процесса при действии эксплуатационных нагрузок.

Далее проводится расчёт параметров ударного нагружения при помощи виброударных устройств.

При анализе ударных процессов практический интерес представляют величина максимальной контактной силы (перегрузки соударяющихся тел) и длительность переднего фронта ударного импульса. Для оценки этих параметров была разработана инженерная методика, основанная на результатах измерения остаточной деформации упруго-пластического демпфера. Подобная упрощённая методика приведена в работе [1]. В нашем случае для расчёта взаимодействия ударника с упруго-пластическим демпфером принимается, что материал демпфера – идеально пластический и характеризуется единственным параметром – пределом текучести. При относительно больших пластических деформациях это допущение приводит к погрешности не более 10 %. При расчёте волновые эффекты в стержне не учитываются.

Процесс взаимодействия ударника с тормозным устройством описывается уравнением:

$$m \frac{dv}{dt} = -p(t), \quad (1)$$

где $p(t)$ – сила в месте контакта ударника с тормозным устройством; m – масса ударника; v – скорость удара. Задача является физически и геометрически нелинейной, поэтому, как правило, решается численным методом. Предварительно поверхность ударника аппроксимируется при помощи кусочно-линейной функции.

Принятая кусочно-линейная аппроксимация поверхности ударника позволяет построить эффективный численный алгоритм расчёта взаимодействия для различных форм наконечника ударника. Для k -го конического участка ударника в процессе взаимодействия с преградой правая часть уравнения движения стержня имеет вид:

$$Q_k = Q_0 \left\{ \cos f_i \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \sum_{i=2}^{k-1} \cos f_i \left\langle \frac{a_i^2 - a_{i-1}^2}{a_n^2} \right\rangle + \cos f_k \left\langle \left[\frac{a_{k-1}}{a_n} + \frac{\left(y - \sum_{m=1}^{k-1} h_m \right) \text{ctg} f_k^2}{a_n} \right]^2 - \frac{a_{k-1}^2}{a_n^2} \right\rangle \right\},$$

где $Q_0 = \frac{\pi \sigma_T g a_n^2}{m}$ – правая часть уравнения для

стержня с плоским торцом; a_n – радиус стержня; m – масса стержня; σ_T – предел текучести материала демпфера; $g=9,8 \text{ м/с}^2$; f_k – угол k -го конического участка; a_k – радиус основания k -го конического участка; h_k – высота k -го конического участка аппроксимации; y – перемещение ударника. Из общей формы правой части уравнения выделим два частных случая, имеющих практическое значение:

- плоский наконечник ударника $Q_1 = Q_0$;
- наконечник с фаской h_1 на плоском торце при $y < h_1$:

$$Q_k = Q_0 \left\{ \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \cos f_1 \left\langle \left[\frac{a_1 + y \text{ctg} f_1}{a_n} \right]^2 - \frac{a_1^2}{a_n^2} \right\rangle \right\};$$

при $y < h_1$

$$Q_k = Q_0 \left\{ \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \cos f_1 \left\langle 1 - \frac{a_1^2}{a_n^2} \right\rangle \right\}.$$

На рис. 1 представлены результаты расчёта глубины кратера в упруго-пластическом демпфере при различных скоростях удара и форме наконечника ударника.

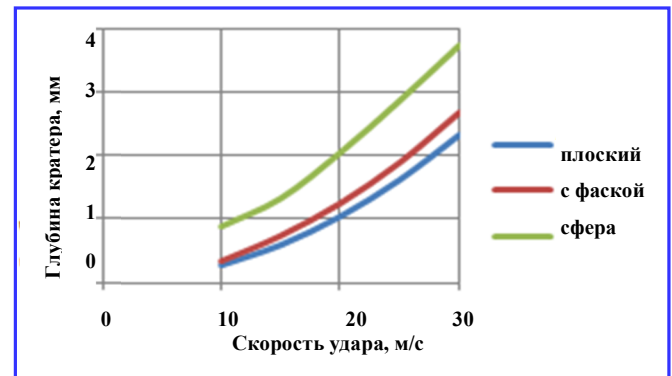


Рис. 1. Зависимость глубины кратера от скорости удара для различных форм наконечника

Для разработанной инженерной методики расчёта параметров удара была составлена диалоговая программа на VBA Excel. На лист Excel выводятся максимальное ускорение в точке удара, время активной фазы нагружения и величина остаточной деформации демпфера.

С использованием данной программы проводится предварительная оценка параметров удар-

ного устройства и выбирается материал демпфера.

На опытной сборке в выбранных точках нагружения (как правило, в местах срабатывания пиросредств или в узлах, через которые на конструкцию КА передаются виброударные нагрузки) устанавливаются устройства ударного воздействия и проводятся отладочные испытания с вариацией параметров удара по скорости и мощности порохового патрона для обеспечения требуемых значений ударной нагрузки.

Проводится обработка и анализ результатов отладочных испытаний, оценка повторяемости результатов и соответствия полученного спектра удара заданному режиму испытаний в пределах принятого допуска.

Проводятся виброударные испытания опытной сборки в соответствии с программой испытаний.

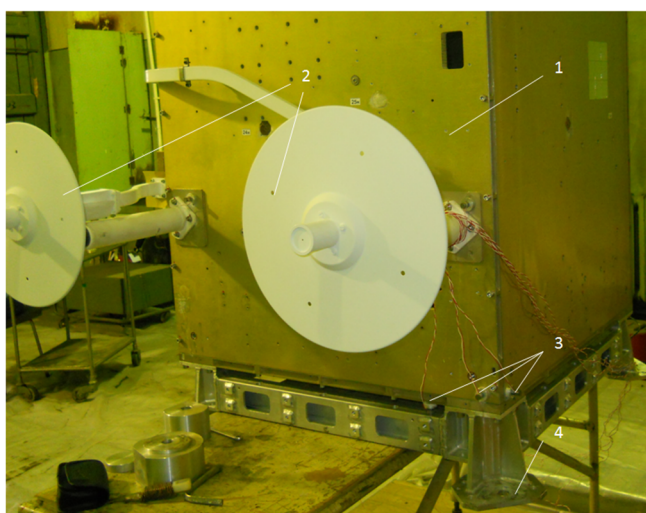


Рис. 2. Автономные испытания на стойкость к пиродарным нагрузкам: 1 – ДИ КА «Канопус-В»; 2 – АФУ РЛЦИ; 3 – розетка датчиков; 4 – место ударного воздействия

Апробация методики при испытаниях АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В»

Для воспроизведения требуемого квалификационного уровня СУ при испытаниях опытной сборки – динамического изделия (ДИ) КА «Канопус-В», в состав которой входил силовой корпус со штатными трёхслойными панелями и две конструкции АФУ РЛЦИ, использовались разработанные во ВНИИЭМ СПУ и ручное МПУ, входящие в состав специализированного ударного стенда для отработки автономной стойкости БА к пиродарным нагрузкам. Сборка при испытаниях

устанавливалась на четырёх штатных фланцах на стол, и далее на силовой пол лабораторного зала. Ударные воздействия создавались на опорных элементах сборки. Контроль режима нагружения осуществлялся при помощи розетки датчиков ускорения, установленной на силовом корпусе в непосредственной близости от точки удара. Режимы нагружения в окрестности узлов крепления АФУ к конструкции силового корпуса определялись при помощи розеток датчиков. Схема испытаний показана на рис. 2.

При использовании мобильного пиродарника МПУ, созданного на базе строительного пистолета ПЦ-84, энергия удара регулируется при помощи использования промышленных патронов различной мощности (типа Д1 – Д5) и подбора характеристик упруго-пластического демпфера. Для СПУ (рис. 3), которое устанавливается на изделие при помощи струбцин или болтов, кроме перечисленных выше средств, используется дополнительное устройство регулировки скорости удара изменением пути разгона ударника.

Перед началом испытаний были проведены расчёты и определены: оптимальная форма наконечника – сферическая, тип патрона – Д3 и параметры демпфера (АМГ, толщина 8 мм). По этим параметрам проводилась настройка пиродарника.

Были проведены испытания. Полученная осциллограмма датчиков по осям X, Y, Z при испытаниях вдоль соответствующих осей представлена на рис. 4.

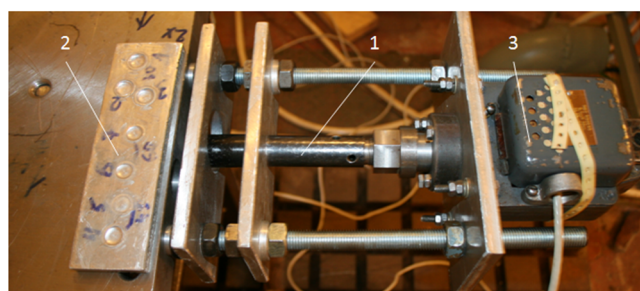


Рис. 3. СПУ: 1 – ствол ударника; 2 – упруго-пластическая прокладка; 3 – электромагнитный инициатор

Полученный режим ударных испытаний АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В» соответствовал заданным требованиям, и по результатам испытаний ударостойкость АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В» была успешно подтверждена.

Положительные результаты испытаний свидетельствуют об успешной апробации типовой методики испытаний сборок.

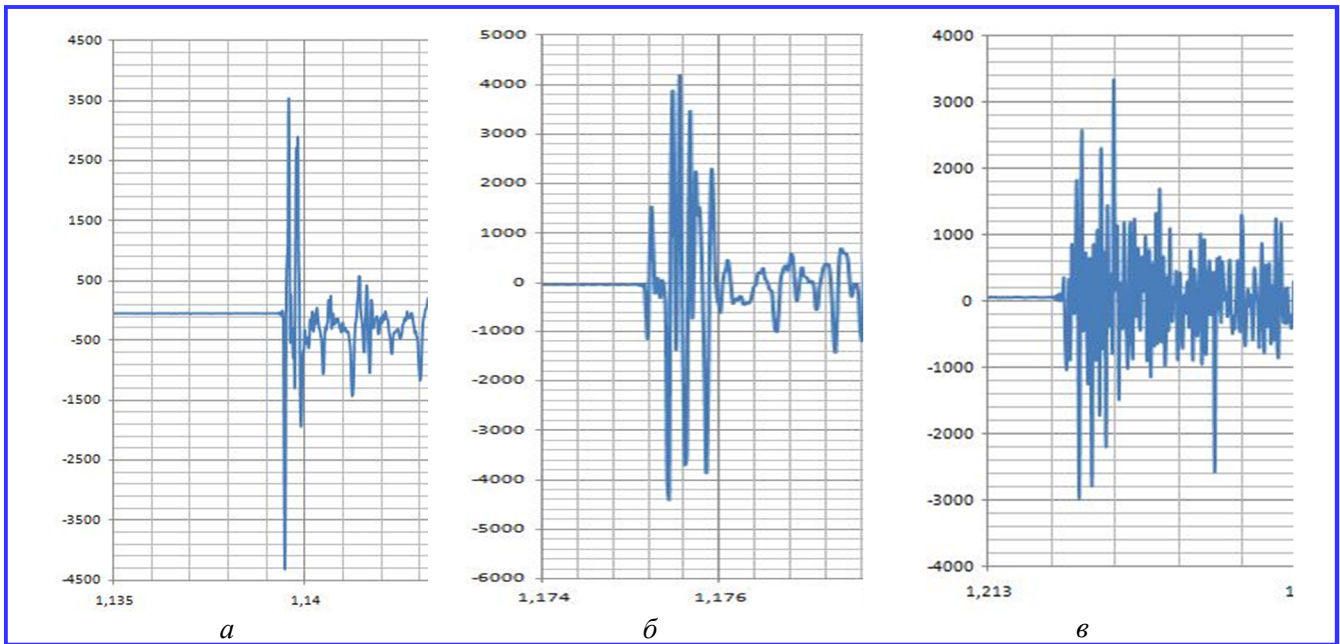


Рис. 4. Осциллограмма с датчиков при испытаниях вдоль соответствующих осей: *a* – X; *b* – Y; *v* – Z

Типовая методика автономных испытаний БА

Если информация по эксплуатационным ударным нагрузкам отсутствует, квалификационные (зачётные) испытания оборудования проводятся на стенде с использованием ударных устройств для моделирования нормированных по СУ ударных нагрузок, так как при воспроизведении нормированных ударных нагрузок на опытной сборке КА возможности регулировки частотных характеристик СУ весьма ограничены и проведение таких испытаний труднореализуемо.

Традиционно нормированный СУ задаётся в виде билинейной (реже – трилинейной) зависимости амплитуды спектра от частоты, заданной в логарифмических масштабах частоты и амплитуды спектра соответственно. На графике СУ, как правило, присутствует одна (реже – две) характерные точки перегиба СУ.

Методика подготовки и проведения виброударных испытаний БА на стенде состоит из следующих этапов:

- выбора из норм прочности режима испытания в форме СУ или одиночного импульса перегрузки, определения частоты f_{srs} и амплитуды A характерной точки нормированного спектра (точка перегиба билинейной характеристики), задания веса Q_i и габаритов макета прибора;

- оценки параметров платформы стенда (a, b, h) для характерной частоты СУ по расчётной зависимости (2) при $f = f_{srs}$, выбранным граничным условиям по контуру платформы и весу прибора:

$$f = \frac{k_m k_b C h 10^4}{a^2}, \text{Гц}, \quad (2)$$

где k_m – поправочный коэффициент для материала пластины по отношению к стали; $k_b = \sqrt{1 + \frac{Q_i}{Q_p}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий присоединённый вес оборудования; h – толщина пластины; a – величина максимальной стороны пластины;

$$C = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-y^2)\rho}}; a - \text{коэффициент, зависящий}$$

от способа закрепления сторон пластины и отношения сторон пластины [2]; E – модуль упругости; y – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала пластины; Q_p – вес пластины.

Дополнительно оцениваются частоты колебаний в плоскости пластины по формулам:

$$f_a = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, f_b = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

где a, b – стороны пластины.

Для оценочных расчётов оптимальных параметров системы стенд/прибор при заданных характерной частоте СУ и весе прибора уравнение (2) решим относительно величины большей стороны a пластины:

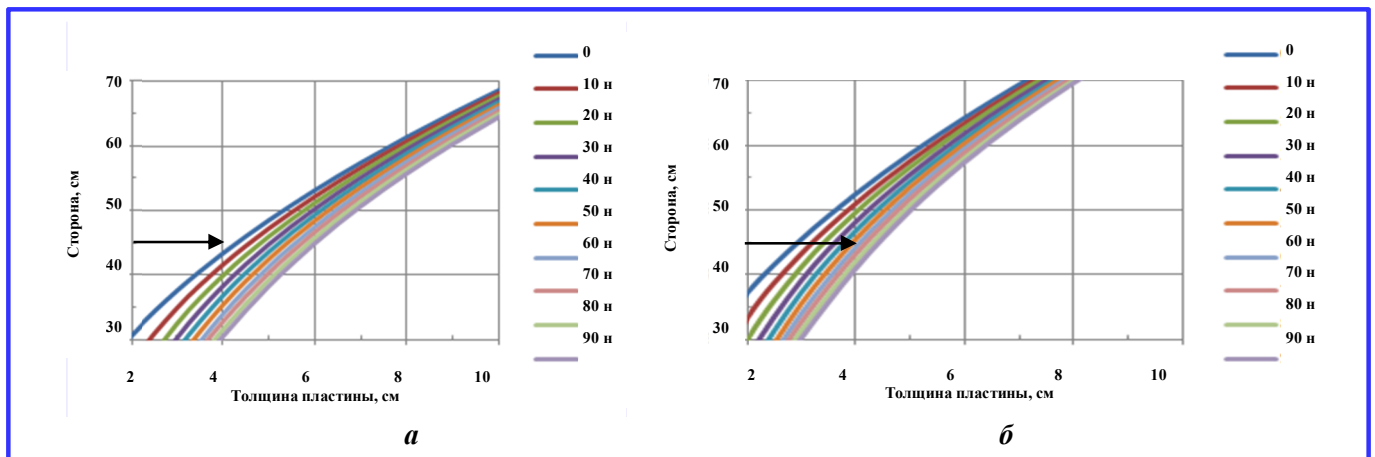


Рис. 5. Расчёт параметров пластины для двух случаев закрепления: *a* – опирание по контуру; *б* – опирание с защемлением при различных условиях закрепления

$$a = \sqrt{-\frac{Q_i}{2hpk} + \sqrt{\frac{Q_i^2}{4h^2p^2k^2} + \frac{c^2h^2k_m^210^8}{f^2}}}, \quad (4)$$

где $k=b/a$ – отношение сторон.

Для расчёта по формуле (4) была составлена программа на языке VBA EXCEL. Программа содержит таблицы коэффициентов граничных условий [1] и механических свойств материалов. В результате расчёта на диалоговое окно выводятся основные частоты пластины, а на лист 1 – серия табличных и графических форм для заданной частоты СУ, граничных условий и веса прибора.

На рис. 5 представлены примеры расчёта оптимальных параметров пластины стенда при различном весе испытываемых приборов и граничных условиях. Величины сторон платформы предварительно выбираются исходя из площади, занимаемой узлами крепления макета прибора.

На рис. 5 стрелками показаны параметры, близкие к параметрам основной пластины существующего стенда, для двух случаев краевых условий по контуру платформы. По данным зависимостям можно оценить возможности существующей пластины при варьировании граничных условий. Так, на штатной пластине при опирании по контуру можно испытывать приборы с относительно малым весом (0 – 10 Н), а при опирании с защемлением (рис.5, б) – с весом 40 – 90 Н.

При необходимости в высокочастотной области параметры заданного СУ корректируются при помощи ударных устройств, действующих по торцам платформы в плоскости основной пластины. В случае невозможности реализовать на имеющейся оснастке (пластине) заданный ударный режим методика позволяет подготовить ТЗ на изготовление

пластины с необходимыми характеристиками. Аналогичные расчётные величины в соответствии с (3) можно получить для других соотношений сторон пластины, граничных условий и используемых материалов пластины.

На рис. 6 приведены параметры квадратной пластины при $f=1000$ Гц, $Q=30$ Н и при различных условиях закрепления.

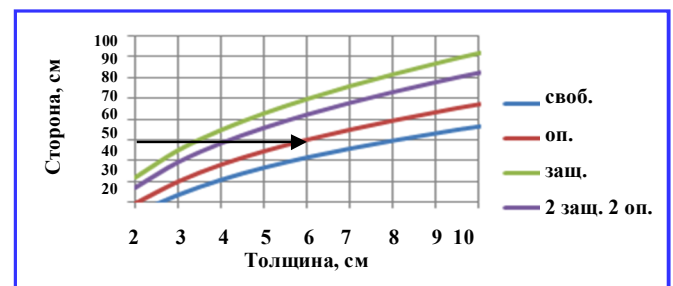


Рис. 6. Параметры квадратной пластины при различных условиях закрепления

Для подтверждения характерной частоты платформы стенда с установленным весовым макетом прибора проводятся частотные испытания с использованием ручного ударного молотка или пиродударника.

Для создания режима испытаний аппаратуры изделия задаётся ударный спектр или эквивалентный для характерной частоты ударный импульс перегрузки:

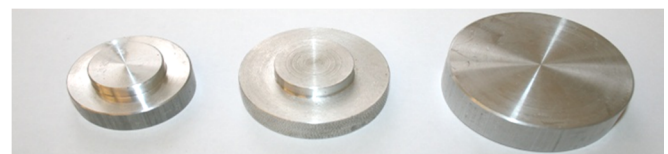


Рис. 7. Типовые шайбы для стендовых испытаний

– формирование заданных параметров импульса перегрузки осуществляется при помощи пиротехнического устройства, состоящего из механического ударника, индустриального патрона и упруго-пластического демпфера в форме шайбы из АМг6 (рис. 7).

– скорость удара механического ударника – пиротехнического устройства регулируется с использованием данных тарировочных зависимостей, полученных для патронов различной мощности и величины пути разгона ударника в стволе. На рис. 8 приведён пример тарировочных зависимостей, полученных для патронов Д2, Д3, Д4.

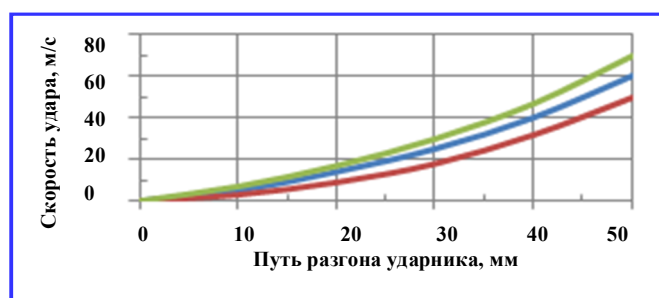


Рис. 8. Зависимость скорости удара от пути разгона ударника

Далее процесс проведения испытаний включает следующие операции:

– проводится выбор материала и характеристик упруго-пластического демпфера по результатам расчёта;

– на платформе стенда в выбранных точках устанавливаются устройства ударного воздействия и проводятся для габаритно-массового макета прибора отладочные испытания с вариацией параметров удара по скорости и мощности порохового па-

трона для обеспечения требуемых значений ударной нагрузки;

– проводится обработка и анализ результатов отладочных испытаний, оценка повторяемости результатов и соответствия полученного спектра удара заданному режиму испытаний в пределах принятого допуска;

– проводятся виброударные испытания прибора в соответствии с программой испытаний.

Апробация данной методики проводилась при испытании бортовой вычислительной машины для КА «Метеор-М» № 2, а также при испытаниях для оценки ударостойкости герконов. Результаты испытаний позволили дать рекомендации по снижению уровней виброударных нагрузок на оборудование.

Заключение

Разработаны и апробированы типовые методики виброударных испытаний опытных сборок КА и оборудования, которые позволяют провести полный объём наземной отработки ударной стойкости изделий космического применения (конструкции и оборудования КА) и повысить надёжность перспективных изделий. При этом испытания могут проводиться как с использованием макета КА или других опытныхборок в качестве оснастки, так и автономно на специализированном стенде.

Литература

1. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М.: Сов. радио., 1971.
2. Батуев Г. С. и др. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев и др. – М., 1977.

Поступила в редакцию 26.06.2014

Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук, начальник лаборатории.

*Михаил Викторович Пустобаев, аспирант, мл. научн. сотрудник,
e-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com, т. (495) 366-79-52.*

Анатолий Дмитриевич Судомоев, канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник.

*Андрей Павлович Тютнев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник,
т. (495) 366-38-38.*