

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «СТЕНД С ОБЪЕКТОМ ИСПЫТАНИЙ/УДАРНОЕ УСТРОЙСТВО» ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

М.В. Пустобаев  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Представлены материалы по исследованию влияния физико-механических и геометрических параметров системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» на получаемые характеристики ударного процесса: длительность и амплитуду импульса, спектр удара. Приведены расчётные данные, которые сопоставлены с экспериментальными. Даны рекомендации по выбору параметров системы при её использовании в испытаниях на стойкость бортовой аппаратуры к ударам от пиротехнических средств.*

**Ключевые слова:** испытания, пластина, пиротехнические устройства, удар, собственная частота, спектр удара, форма.

В процессе разработки программы стендовых испытаний бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов на пиротехнические удары необходимо учитывать ряд положений, связанных с особенностями воспроизведения нормированных нагрузок в форме одиночного импульса перегрузки или спектра удара (СУ), которые для каждого конкретного технического задания на испытания БА требуют соответствующей адаптации элементов используемых стендов. В отличие от вибрационных и акустических испытаний, ударная нагрузка формируется как динамическая реакция в области узлов крепления испытываемого оборудования на нагружение в локальной точке платформы стенда.

В этом случае режим нагружения напрямую связан с частотными характеристиками системы платформа стенда/объект испытаний.

Под стендом для испытаний на ударные нагрузки подразумевается неподвижный стенд с платформой, на которую установлен объект испытаний – БА. В качестве ударного устройства выступает пиротехнический ударник пиротехнической природы. При испытаниях при возбуждении ударных нагрузок объект испытаний имеет нулевую скорость, что обеспечивает возможность имитирования высокочастотного удара, характерного для ударных нагрузок от срабатывания пиросредств в ближней и средней зоне, при этом объект испытаний не перегружается в области низких частот.

Фактором, оказывающим существенное влияние на область применения конкретного стендового оборудования, является применяемая методика имитирования заданных нормированных ударных

нагрузок. В целом можно выделить два вида стендовых виброударных испытаний:

- с использованием источника ударного воздействия в форме одиночного импульса перегрузки заданной амплитуды и длительности;
- воспроизведение заданных нагрузок с моделированием ударного спектра.

Преимуществом первого вида испытаний является то, что при локальном ударе на выбранной точке платформы стенда в окрестности узлов крепления БА создается виброударный процесс с экстремальными амплитудами, близкими к заданным в ТЗ на испытания. Длительность удара в этом случае является параметром оценки динамичности воздействия одиночного удара на конструкцию стенда. Считается, что если ударная нагрузка носит импульсный характер для платформы стенда, то параметры нагрузки не влияют на её основные частотные характеристики. Контроль режима нагружения осуществляется по оценкам экстремальных амплитуд виброударного процесса в окрестности узлов крепления объекта испытаний.

При моделировании режима нагружения в форме ударного спектра требования предъявляются не только к амплитудным значениям виброударного процесса, но и к его частотному составу. Как правило, основные частоты системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» (далее система «Стенд») не совпадают с заданными в ТЗ на испытания характеристиками СУ.

Поэтому на этапе разработки программы и методики испытаний БА на ударное нагружение в форме СУ необходимо провести методические

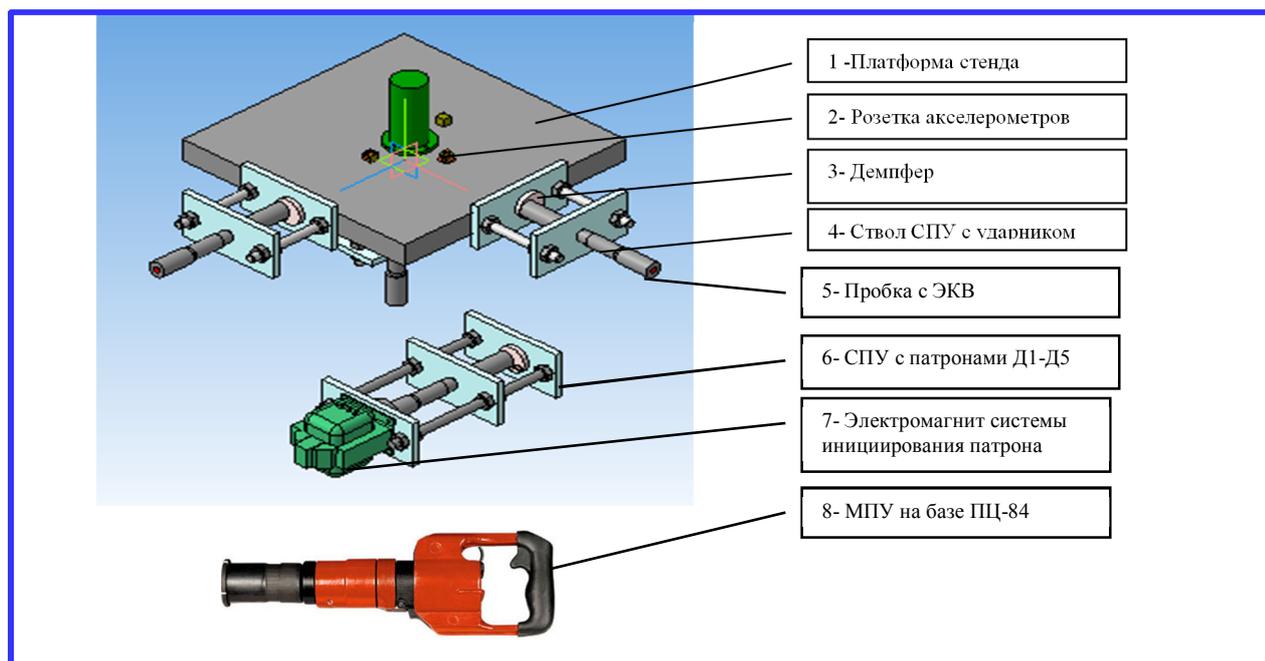


Рис. 1. Общий вид системы ВС

экспериментально-теоретические работы по адаптации параметров системы к основным частотным характеристикам СУ. Это является первым этапом проектирования технологической оснастки стенда.

Далее, для адаптированной по частотным характеристикам системы «Стенд» подбирается ударная нагрузка с использованием пиротехнических устройств, создающих импульсное локальное нагружение системы с возбуждением основных собственных частот в заданном частотном диапазоне.

Для решения этих задач необходимо исследовать влияние варьируемых параметров системы «Стенд» на получаемые характеристики ударного процесса – длительность и амплитуду импульса, спектр удара.

В качестве исследуемой рассматривается система виброударного стенда (ВС), представленная на рис.1.

Комплектующие элементы ВС:

**Ударные устройства.** На рис. 1 представлено ручное мобильное пироударное устройство (МПУ), собранное на базе индустриального пистолета ПЦ-84. От серийного устройства ПЦ-84 в МПУ используется корпус, устройство иницирования патрона и шток. Преимуществом такого вида ударного устройства является возможность создать локальное ударное воздействие практически в любой точке стенда. При этом скорость удара штока по упруго-пластическому демпферу регу-

лируется выбором патронов различной мощности. МПУ имеет ограничения по созданию относительно малых скоростей удара и в основном используется для создания интенсивных перегрузок в высокочастотной области СУ.

Стеновое пиротехническое устройство (СПУ) устанавливается на платформе (см. рис.1) при помощи узлов крепления и в направлении удара по заданным осям нагружения объекта испытаний. По сравнению с МПУ, СПУ позволяет варьировать скорость удара в более широком диапазоне значений. Кроме этого, имеется возможность использовать при испытаниях несколько СПУ для моделирования СУ от различного вида пиротехнических устройств отделения КА.

**Платформа стенда.** Платформа стенда в форме пластины представляет собой металлический параллелепипед размерами  $a \times b \times h$ . Платформа оснащена дополнительными элементами технологической оснастки, позволяющими реализовать различные схемы закрепления её краев. Также могут применяться съёмные пластины для других схем закрепления объекта испытаний.

**Упругопластическая проставка.** Проставка служит для формирования локального ударного импульса ускорения, входит в элементы крепления СПУ к платформе стенда (см. рис.1) и устанавливает связь между поверхностью платформы и ударником СПУ. Проставка представляет собой

круглую или прямоугольную металлическую пластину, устанавливаемую на платформе в местах воздействия локальной ударной нагрузки.

**Методика исследования**

Объектом исследования является система «Стенд». Предметом исследования является изучение влияния варьируемых параметров (факторов) системы на характеристики получаемого ударного процесса. Принятые методы исследования – расчётный и экспериментальный.

Исследуемые факторы можно разделить на две группы:

а) факторы, влияющие на частотные характеристики виброударного процесса в окрестности крепления БА к платформе стенда. К этим факторам относятся такие параметры платформы стенда с ОИ как: геометрические размеры пластины  $a \times b \times h$ , материал пластины, вид закрепления пластины (граничные условия), вес макета БА;

б) факторы, влияющие на амплитуду удара (уровень спектра удара): скорость удара стержня СПУ или МПУ, форма наконечника стержня (плоский/с фаской/сферический); объём камеры сгорания и путь разгона стержня (определяются начальным положением стержня в стволе), мощность промышленного патрона, материал и толщина упругопластической проставки.

*Исследование факторов группы «а».* Система «Стенд» рассматривается как линейно-упругая колебательная модель. При импульсном ударном нагружении реакция модели в различных точках определяется собственными частотами и формами колебаний. Цель исследований – определение параметров модели, которые реализуют собственные частоты системы, отвечающие требованиям к характерным частотным составляющим заданного СУ.

Проведём расчётную оценку собственной частоты платформы стенда в зависимости от её геометрических параметров, вида закрепления, физико-механических свойств материала и веса прибора БА по методике [1].

В работе [1] была получена формула (1), которую можно использовать для оценочных расчётов оптимальных параметров системы «Стенд».

Исходными данными являются заданная характерная частота СУ и вес прибора, формула (1) из [1] получена для вычисления величины большей стороны  $a$  пластины стенда:

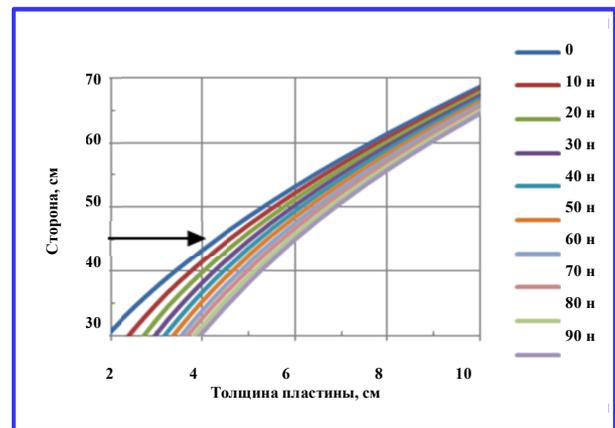
$$a = \sqrt{-\frac{Q_i}{2h\rho k} + \sqrt{\frac{Q_i^2}{4h^2\rho^2k^2} + \frac{c^2h^2k_m^210^8}{f^2}}}. \quad (1)$$

При заданных характерных частотах СУ  $f$ , весе  $Q_i$  и габаритах  $a_0, b_0$  объекта испытаний в плоскости платформы уравнение (1) определяет область четырёх параметров  $a, h, k_m, c$ , в пределах которых методом итераций и перебора решается задача оптимизации их значений. Это связано с тем, что определение экстремума функционала затруднено, так как отсутствует аналитическое выражение для параметра  $c$ .

Для расчёта по (1) была составлена программа на языке VBA EXCEL. Программа содержит также таблицы коэффициентов граничных условий и механических свойств материалов. В результате расчётов 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. 2 представлен пример расчёта оптимальных параметров пластины стенда при различном весе испытываемых приборов и граничных условиях. Начальные величины сторон платформы предварительно выбираются исходя из площади, занимаемой узлами крепления макета прибора.

Представленный на рис. 2 набор зависимостей геометрических параметров пластины от массы объекта испытаний, определенный для конкретного значения характерной частоты, называется тарировочной зависимостью.



**Рис. 2. Пример тарировочной зависимости – расчёт параметров пластины для случая опирания по контуру**

Тарировочная зависимость может быть составлена для различных вариантов закрепления платформы (21 вариант) и материалов пластины. На основе тарировочных зависимостей выбирается начальный вариант параметров платформы ВС.

По любой из представленных тарировочных зависимостей можно оценить влияние того или иного

параметра из группы «а» на характеристики получаемого СУ, например:

- при неизменных длине и ширине платформы стенда для испытаний более тяжелой БА требуется плита с большей толщиной, или же изменение других параметров – например, способ закрепления платформы;

- при одинаковой толщине пластины увеличение длины и ширины платформы стенда сопровождается уменьшением массы объекта испытаний, необходимой для получения характерной частоты.

Также из рис. 2 можно сделать следующие вполне очевидные выводы:

- основная частота собственных колебаний системы «Стенд» уменьшается с увеличением веса прибора. Если для существующего ВС собственная частота получается завышенной, то уменьшить частоту можно за счёт установки на платформу дополнительной массы. В противном случае используются накладные съёмные пластины или изготавливается новая плита;

- начальное значение параметров системы оценивается из анализа предварительно полученного набора расчётных данных в форме параметрических графиков, далее значения уточняются результатами расчёта и подтверждаются частотными испытаниями с весовым макетом прибора.

*Исследование влияния факторов группы «б».* 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, приведённая в работе [1].

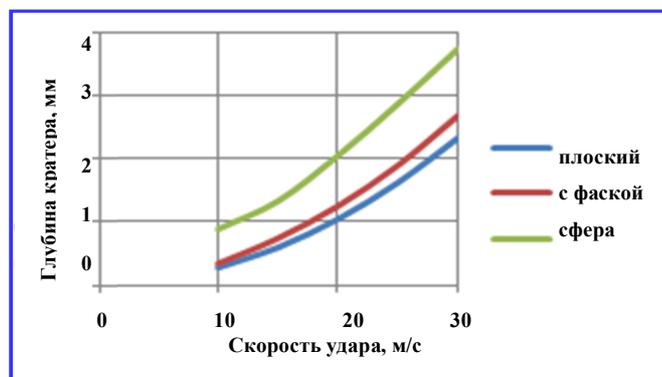


Рис. 3. Зависимость глубины кратера от скорости удара для различных форм наконечника

На основе методики и расчётов создана программа и получены тарировочные зависимости для скорости удара, определяющей энергию ударного взаимодействия.

С помощью программы проведено исследование влияния формы наконечника на глубину кратера в упруго-пластическом демпфере.

На рис. 3 представлены результаты расчёта глубины кратера в упруго-пластическом демпфере при различных скоростях удара и форме наконечника ударника.

Из рис. 3 видно, что при переходе от плоской формы к сферической через коническую увеличивается глубина кратера, также увеличивается время процесса взаимодействия ударника с преградой. Для случая шарового сегмента время взаимодействия в 1,5 – 2 раза превышает время для случая плоского наконечника и наконечника с фаской. Соответственно, характерная частота спектра удара в случае шаровой формы наконечника ниже, чем в других вариантах, её проще «поместить» в диапазон до 10000 Гц, что необходимо для того, чтобы соответствовать процессу реального нагружения при ударных нагрузках от пиросредств в ближней и средней зоне. Амплитуда удара также выше, что однозначно характеризуется глубиной кратера.

Параметры удара в точке воздействия стержня приведены на рис. 4.

Влияние фактора объёма камеры сгорания проявляется в том, что при увеличении камеры путём сдвига стержня по стволу в сторону пластины происходит уменьшение начального давления в камере, что одновременно сопровождается уменьшением пути разгона стержня в стволе, в результате чего уменьшается скорость ударника, и, как следствие, амплитуда удара.

Влияние фактора мощности патрона влияет исключительно на начальную скорость ударника. Увеличение скорости на 20% незначительно (на 3 – 5%) увеличивает время взаимодействия, и значительно (на 10 – 20%) увеличивает глубину кратера, т. е. мощность патрона оказывает существенное влияние на амплитуду удара.

#### Экспериментальная проверка

Для верификации результатов расчёта было проведено два блока серий испытаний, и проанализированы их результаты. Для каждого из четырёх значений объёма пороховой камеры пробки проведена серия испытаний, в которой измерялась глубина вмятины. После обработки результатов рассчитана средняя глубина вмятины в каждой серии, среднеквадратичное отклонение, доверительный интервал ( $P = 0,95$ ) и относительная погрешность. Количественные данные и оценки погрешностей приведены в таблице, из которой следует, что относительная погрешность при проведении однотипных испытаний находится в пределах 5 – 7%.

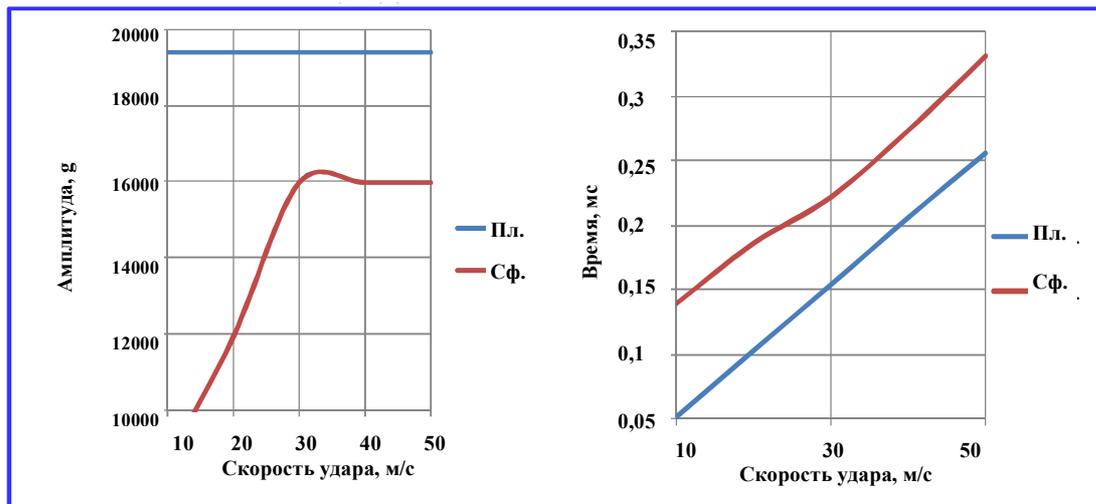


Рис. 4. Амплитуда и время удара для двух вариантов формы наконечника – плоского (пл.) и сферического (сф.)

Следующим этапом экспериментальных исследований было определение тарировочных зависимостей величины вмятины демпфера от мощности используемых строительных патронов типа Д2, Д3, Д4, Д5. Все результаты получены для ударника с плоским торцом. В этом случае вмятина имеет чёткую цилиндрическую форму, что позволяет провести измерения с высокой точностью.

Была проведена серия испытаний и построены тарировочные зависимости средних зна-

чений (рис. 5) для демпфера из АМгб. Из анализа результатов можно сделать вывод, что величина мощности патронов существенно влияет на параметры удара, что подтверждает результаты расчёта.

Использование полученных результатов позволяет оперативно и с приемлемой точностью (5 – 7%) подбирать исходные параметры элементов СПУ для обеспечения заданных испытательных режимов виброударных испытаний.

**Глубина вмятины для четырех объёмов пороховой камеры пробки**

Объём пороховой камеры, см <sup>3</sup>	№ опыта	Глубина вмятины, см	Среднее, см	Среднеквадратичное отклонение	Доверительный интервал	Относит. погрешность, %
0,472	1	2,95	2,97	0,044	0,189612	6,39
	2	3,05				
	3	2,9				
1,762	1	2,55	2,5	0,029	0,12413	4,96
	2	2,45				
	3	2,5				
4,932	1	2,1	2,12	0,017	0,072	3,38
	2	2,15				
	3	2,1				
8,072	1	1,5	1,45	0,017	0,072	4,94
	2	1,45				
	3	1,4				

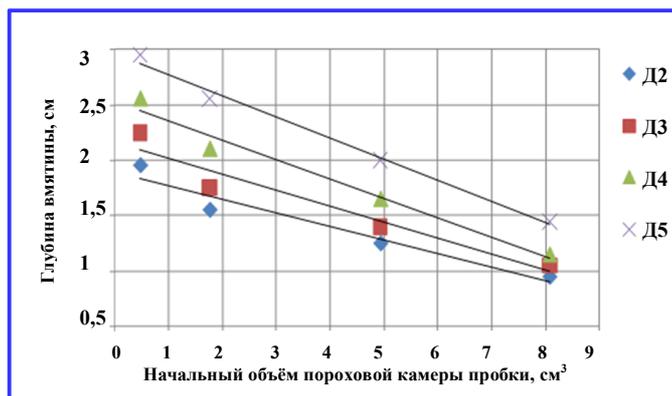


Рис. 5. Глубина вмятины демпфера в зависимости от типа патрона Д2, Д3, Д4, Д5 и начального объема пороховой камеры пробки

Для ударника с плоским наконечником имеется аналитическое решение, по которому, используя полученные оценки погрешностей глубины вмятины, можно получить оценки косвенных измерений скорости и времени активной фазы нагружения по формулам:

$$V_0^2 = 2 \cdot y_{\max} Q_0, \quad t_a = \frac{V_0}{Q_0}, \quad (2)$$

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

стержня с плоским торцом,  $a_n$  – радиус цилиндрической вмятины,  $y_{\max}$  – глубина вмятины,  $m$  – масса стержня,  $\sigma_T$  – предел текучести материала демпфера,  $V_0$  – начальная скорость удара стержня.

Так, для выбранной скорости удара относительная погрешность по известной методике определяется по соотношению:

Поступила в редакцию 08.10.2014

$$\varepsilon_{v_0} = \frac{1}{V_0} \sqrt{\left(\frac{\partial V_0}{\partial a_n}\right)^2 \Delta a_n^2 + \left(\frac{\partial V_0}{\partial y_{\max}}\right)^2 \Delta y_{\max}^2},$$

где  $\Delta a_n$ ,  $\Delta y_{\max}$  – доверительные интервалы погрешности измерений радиуса и глубины кратера.

### Выводы

1. Основная частота собственных колебаний системы «Стенд» уменьшается с увеличением веса испытуемого прибора.

2. Для адаптации параметров системы к заданным частотным характеристикам СУ начальное значение параметров системы оценивается из анализа предварительно полученного набора расчётных данных в форме параметрических графиков, а далее значения уточняются результатами расчёта и подтверждаются частотными испытаниями с весом макетом прибора.

3. Факторами, оказывающими существенное влияние на амплитуду получаемого в системе спектра удара, являются мощность патрона и начальная скорость удара.

4. Проведены испытания, подтвердившие часть теоретических расчётных зависимостей, при испытаниях на стенде имеет место высокая повторяемость и прогнозируемость результатов.

### Литература

1. Канунникова Е. А., Пустобаев М. В., Судомоев А. Д., Тютнев А. П. Разработка типовых методик испытаний опытных сборок КА и БА на стойкость к пиротехническим ударам // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 140. – № 3. – С. 35 – 40.

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