

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МАКЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КАНОПУС-В» № 1

Л.А. Амелин, А.В. Мовчан,
С.В. Муравьев, Н.А. Сенник
(ОАО «НИИЭМ»)

Рассмотрены результаты наземных испытаний динамического макета космического аппарата «Канопус-В» № 1, полученные при срабатывании штатных бортовых пиросредств (ПДО-3 в устройствах зачековки солнечных батарей, пирочек на каркасах солнечных батарей и пирозамков системы отделения, разработанных в Южмаше), включая обработку осциллограмм с датчиков, смонтированных непосредственно на узлах установки пиросредств, сравнительный анализ пиковых ускорений и расчёт ударных спектров.

Ключевые слова: динамический макет, наземные испытания, космический аппарат «Канопус-В» № 1, пиросредства, пирозамки, пирочки, устройства зачековки, система отделения, осциллограммы, ударный спектр, пиковое ускорение.

В настоящее время в связи с уменьшением габаритов космических аппаратов и широким применением пиросредств для инициализации механических процессов (раскрытия солнечных батарей, отделения аппарата от ракеты-носителя и т. п.) измерение уровня динамических нагрузок и оценка воздействия на аппаратуру при срабатывании пиросредств являются весьма актуальными. В статье рассмотрены результаты испытаний (включая обработку зависимостей ударного ускорения от времени) динамического макета (ДМ) КА «Канопус-В» № 1 (рис. 1), полученные при срабатывании пиросредств устройств зачековки, пирочек солнечных батарей (БС) и пирозамков системы отделения, разработанных в Южмаш, г. Днепропетровск. Длина КА (по продольной оси X) – 2200 мм; в поперечном направлении КА вписывается в круг диаметром 1850 мм; масса КА ≈ 500 кг.

Корпус аппарата – 6 сотовых панелей общей толщиной по 18 мм; по краям панели жёстко соединены и усилены каркасами. Толщины крайних слоёв равны 0,5 мм и изготовлены из алюминиевого листа В95ПЧАТ1 0,5. По панелям корпуса распределена масса, как указано в таблице.

Моменты инерции, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$: $J_x = 58,45$, $J_y = 116,1$, $J_z = 115,6$.

Устройства зачековки БС предназначены для зачековки (фиксации) на борту КА элементов конструкции, раскрывающихся в орбитальном полёте. После подачи тока на мостики накаливания ПДО-3 происходит его срабатывание; каждый из ПДО-3 создаёт высокое давление в «своём» цилиндре устройства зачековки (каждое такое устройство имеет два цилиндра), чтобы посредством поршня передать достаточное усилие для поворота рычага, освобождающего свои зацепы из зацепления тяг

каркасов БС. В норме все четыре ПДО-3 срабатывают одновременно (рис. 2 – 4).

Осциллограммы ударных нагрузок записывались с датчиков РСВ (тип 350С02), 8309, КД-91 и

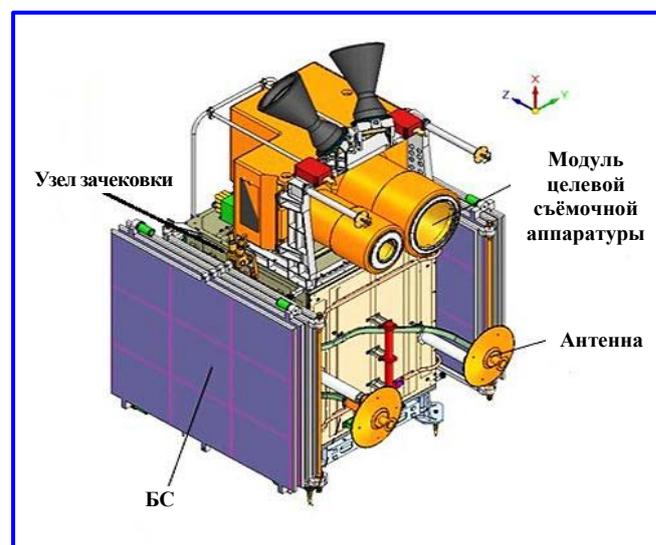


Рис. 1. Общий вид КА с зачекowanными БС

| Панель | Масса (равномерно), кг | Сосредоточенная масса, кг |
|--------|------------------------|---------------------------|
| «-X» | 33,7 | 36,1* |
| «+X» | 38 | 108 |
| «-Y» | 39,4 | 15** |
| «+Y» | 28,4 | 15** |
| «-Z» | 30,1 | – |
| «+Z» | 56,2 | – |

*Масса адаптера и корректирующей двигательной установки.

**Масса крыла солнечной батареи.

П р и м е ч а н и е. Координаты центра масс, мм: $X = 605$, $Y = 0$, $Z = 0$.

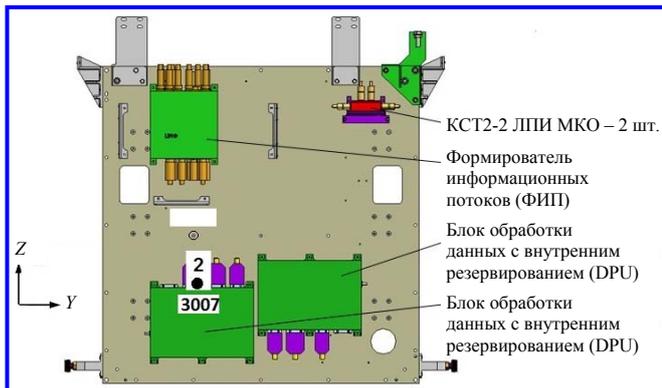


Рис. 2. Датчик РСВ у устройства зачековки, канал 1 через анализатор ZETLAB A17-U8, панель «-Y» датчик 4Н, измерения по «Y»

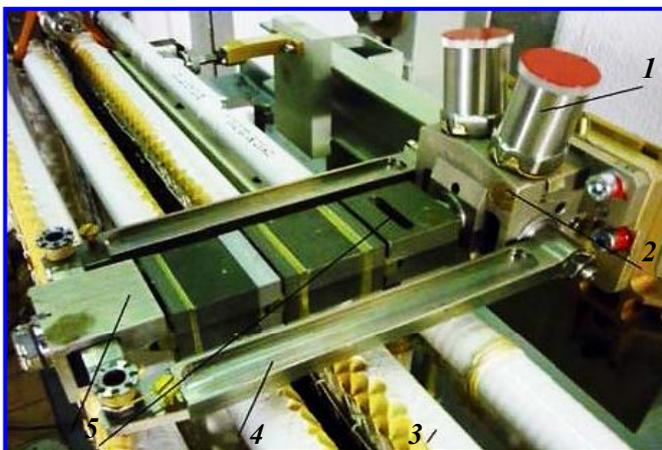


Рис. 3. Устройство зачековки (УЗ): 1 – цилиндр для ПДО-3 (ПДО-3 не установлены); 2 – корпус устройства зачековки; 3 – солнечная батарея (БС); 4 – тяга каркаса БС; 5 – зачекованные элементы конструкции каркаса БС

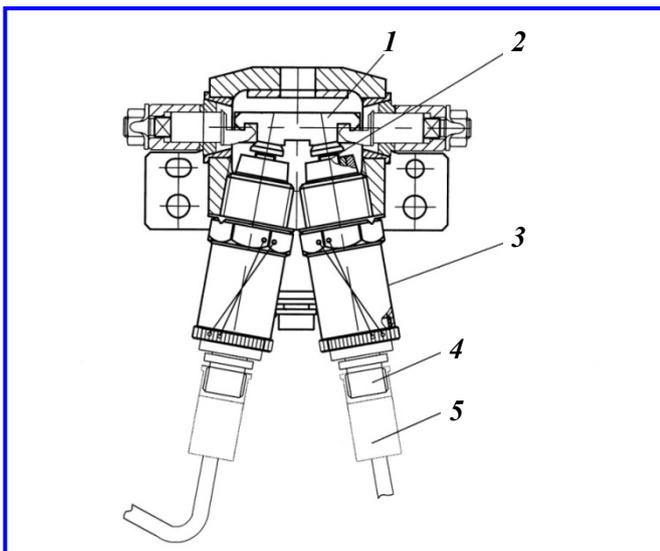


Рис. 4. Конструкция устройства зачековки: 1 – рычаг; 2 – шток; 3 – корпус цилиндра; 4 – пирознергодатчик-обтюратор ПДО-3; 5 – электроразъём

AP11 анализаторами MIC-300M и ZETLAB A17-U8. Устройства зачековки БС смонтированы на корпусе КА. При срабатывании пиросредств зачековки двух устройств (по два пирознергодатчика-обтюратора ПДО-3 в каждом) наибольшее ускорение (a_{max}) достигло $37592,7 \text{ м/с}^2$ (рис. 2).

Канал 2 – датчик был установлен на внутренней части корпуса (панель «+X») у блока «авионики» (измерения по «Y»), расстояние по металлу от ближайшего устройства зачековки $\approx 600 \text{ мм}$, $a_{max} = 801 \text{ м/с}^2$; канал 3 – аккумуляторная батарея (рис. 5, панель «+Y»), измерения по «X», $a_{max} = 1247 \text{ м/с}^2$). Осциллограммы ударного ускорения от времени, полученные при срабатывании пиросредств на посадочных местах приборов, представляют собой мультитональные затухающие колебания, амплитуда которых убывает в несколько раз за сотые доли секунды. Непосредственное сравнение и, тем более, воспроизведение таких осциллограмм затруднено; спектральный анализ такого типа осциллограмм неэффективен.

Для оценки и сравнения уровня динамических нагрузок и воздействия на аппаратуру при испытаниях на одиночные и многократные ударные воздействия, в том числе при срабатывании пиросредств, целесообразно получить ударный спектр [1]. Необходимо отметить, что один и тот же ударный спектр может порождаться множеством различных ударных импульсов. Вне зависимости от формы воспроизводимого входного импульса ударный спектр показывает максимальные перегрузки в испытуемом изделии, но характер усталостных повреждений может существенно различаться в разных стендовых испытаниях [2, 3]. В связи с этим испытания на воздействие от срабатывания пиросредств должны проходить в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, оптимально – при использовании штатных пиросредств в составе динамического (или технологического) макета изделия с обработкой осциллограмм для получения ударного спектра.

На наш взгляд, эффективным инструментом для регистрации и обработки осциллограмм (типа показанных на рис. 6) для получения ударного спектра являются регистраторы-анализаторы динамических параметров MIC-553, оснащаемые измерительными модулями MX-224, MX-240 стандарта PXI, и программное обеспечение послеэкспериментальной обработки результатов

измерений WinПОС в версии «expert» (НПП «МЕРА», Москва).

Ранее расчёт ударных спектров выполнялся программой SHOK/DYMAHO, написанной на языке Pascal (разработка Южмаша). Эта программа, как и программа ИМРАСТ, использованная для обработки осциллограмм в описываемой работе, требует, чтобы осциллограммы были в виде файла формата TXT.

Результаты ударных испытаний, а именно зависимости ударных ускорений $a(t) = \ddot{y}(t)$ от времени в местах установки датчиков, были обработаны программным комплексом ИМРАСТ с целью получения ударного спектра $F(n) = \max_i(\ddot{x} - \ddot{y})$, где \ddot{x} – решение уравнения колебаний системы с одной степенью свободы (осциллятора, имеющего собственную частоту n и коэффициент затухания $\beta = \pi n/Q$, где Q – добротность): $(\ddot{x} - \ddot{y}) + 2\beta(\dot{x} - \dot{y}) + (2\pi n)^2(x - y) = -\ddot{y}(t)$.

Это уравнение не имеет аналитического решения для произвольного воздействия $y(t)$; представив входное воздействие в виде конечных разностей, его решают численным методом по формуле [2]:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i = & 2\exp[-\beta D] \cos[w_d D] \ddot{x}_{i-1} - \exp[-2\beta D] \ddot{x}_{i-2} + 2\beta D \ddot{y}_i + \\ & + w D \exp[-\beta D] \{ (w/w_d) [1 - 2\xi^2] \sin[w_d D] - \\ & - 2\xi \cos[w_d D] \} \ddot{y}_{i-1}, \end{aligned}$$

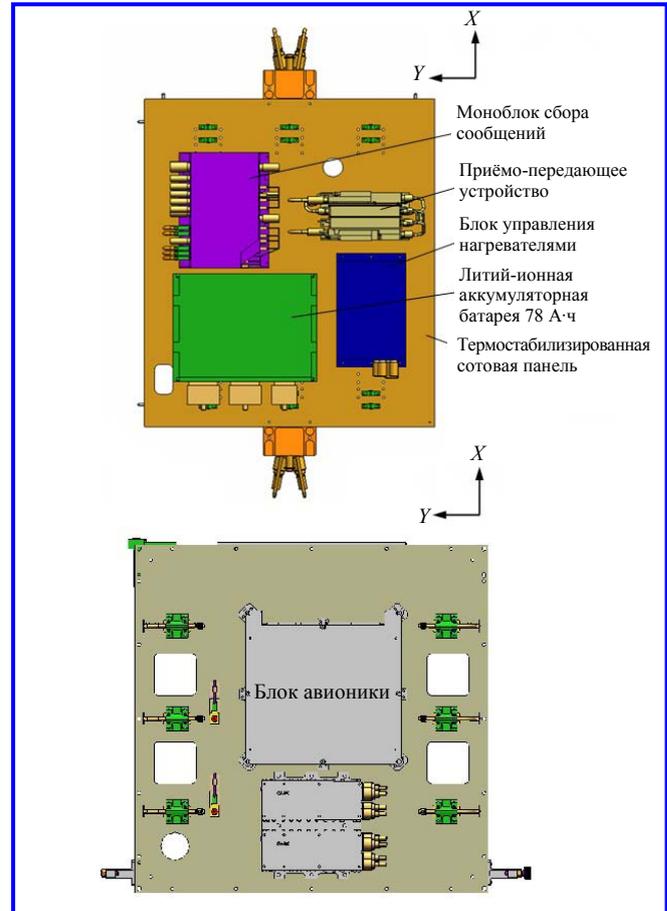


Рис. 5. Расположение блока «авионики» и аккумуляторной батареи

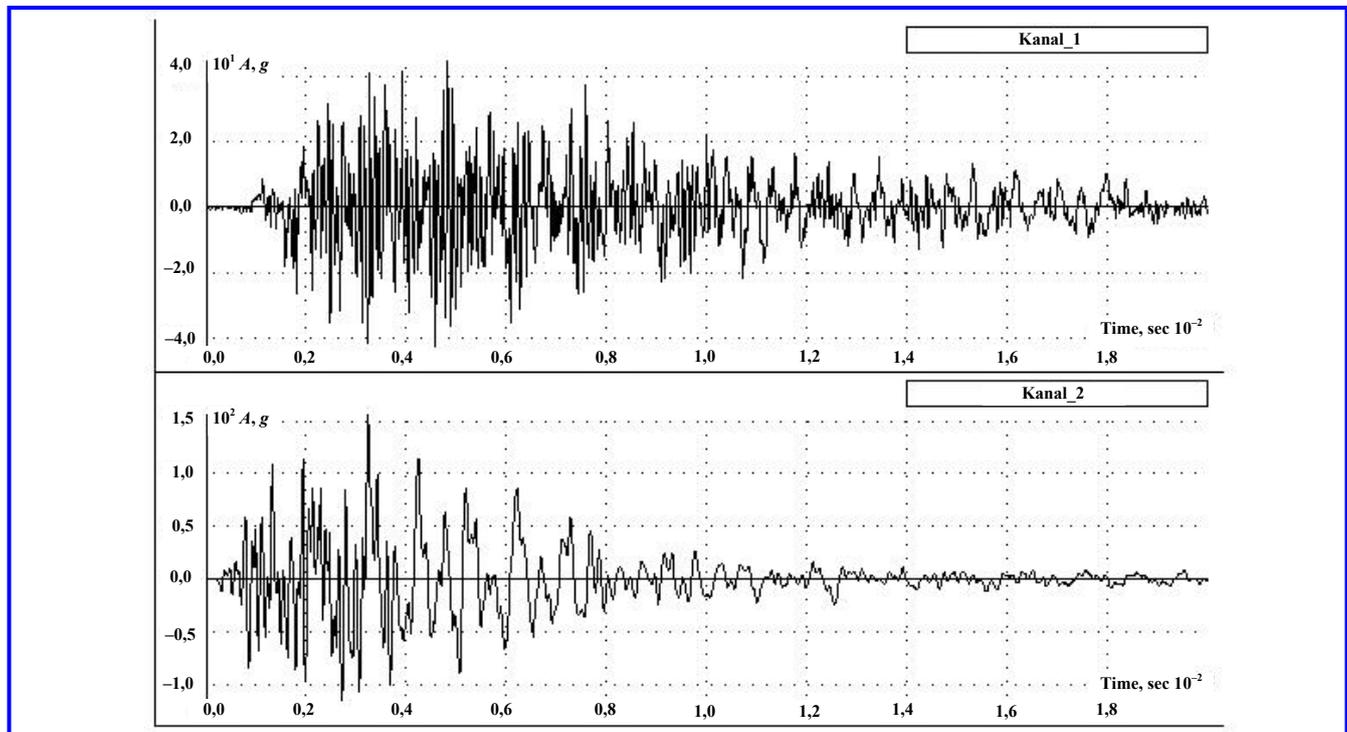


Рис. 6. Сигналы с каналов 1 и 2 (анализатор МПС-300М) при срабатывании ПДО-3 узла зачеховки

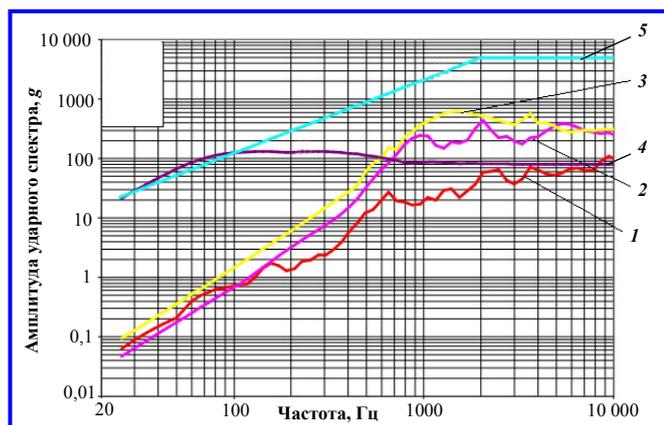


Рис. 7. Ударные спектры каналов 1 – 3; 4 – полуволна синусоиды с амплитудой 80 г и длительностью от 3 до 6 м·с; 5 – нормы прочности КА

где D – временной интервал, с которым зарегистрирована последовательность $y(t)$, определяемый частотой дискретизации АЦП; $\beta = \pi n_n / Q$, $w_d = w(1 - \xi^2)^{1/2}$, $w = 2\pi n_n$, $\xi = 0,5/Q$, n_n – собственная частота осциллятора, для которой рассчитывается ускорение в i -й момент времени ($t_i = iD$). Далее программа находит максимальное значение $F(n_n) = \max_i(\ddot{x} - \ddot{y})$ из всех значений $\ddot{x}(t_i) - \ddot{y}(t_i)$.

По завершении расчёта $F(n_n)$ для всех значений частоты n_n (обычно по 10 на декаду) выдаётся график – ударный спектр [4].

Для сравнения с ударными спектрами каналов 1 и 2 на рис. 7 приведены ударный спектр из норм прочности КА и ударный спектр от единичного удара, соответствующего полуволне синусоиды с амплитудой 80 г и длительностью от 3 до 6 м·с. Обработка проводилась для добротности $Q = 10$. Расчёт ударных спектров позволил достаточно точно определить, что уровень воздействия на приборы не выше указанного в нормах прочности. Сравнительный анализ уровней воздействия на ДМ КА от срабатывания штатных

пиросредств показывает, что наибольший уровень воздействия исходит от ПДО-3 устройств зачековки БС. При отстреле пирочек, регистрация которых проводилась через анализатор ZETLAB A17-U8, пиковые ускорения находились в диапазоне 5228 – 17072 м/с² (пирочки установлены на каркасах БС, их срабатывание освобождает механизм раскрытия крайних створок). Ударные спектры, полученные обработкой осциллограмм с датчиков, смонтированных непосредственно на узлах установки пирочек, лежат ниже ударного спектра из «Норм. прочности». При срабатывании четырёх пирозамков системы отделения пиковые ускорения находились в диапазоне 65 – 423 м/с², за исключением места на системе отделения, где по направлению «Х» пиковое ускорение достигло 11079 м/с².

Испытания подтвердили работоспособность механизмов раскрытия и системы отделения, а также ударопрочность ДМ КА, включая сохранение герметичности трубопроводов корректирующей двигательной установки. Для снижения ударного воздействия на КА в виде рекомендации предложена в будущем замена ПДО-3 на ПДО-1, с обязательным проведением отработочных испытаний устройств зачековки БС.

Литература

1. Broch J. T. Mechanical vibration and shock measurements / J. T. Broch. – Denmark: Bruel & Kjaer, 1984.
2. Shock and vibration handbook / C. M. Harris and C. E. Crede. – New York : McGraw – Hill Company, Inc. 1976. – 1218 p.
3. Субботин С. Г., Мельникова А. Ю. Спектральные характеристики для сравнения и идентификации ударных нагрузений / С. Г. Субботин, А. Ю. Мельникова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М. : ООО «Издательство «ГЕСТ-ЗЛ», 2009. – Т. 75. – № 12. – С. 53 – 56.
4. Вибрации в технике: справочник в 6 томах. Том 5 / Под ред. М. Д. Генкина. Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1981. – 496 с. : ил.

Поступила в редакцию 01.10.2013

Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, начальник сектора, т. (495) 994-54-88, e-mail: am-leonid@mail.ru.

Анатолий Васильевич Мовчан, начальник лаборатории, т. (495) 994-54-88, e-mail: fenix@mail.ru.

Сергей Владимирович Муравьёв, ведущий инженер, т. (495) 994-54-88, e-mail: otd11@niiem.ru.

Николай Александрович Сеник, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела, т. (495) 994-54-88, e-mail: otd11@niiem.ru.