

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 629.78

## СТЕНД ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПЛАТФОРМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е.В. Афромеев, С.Г. Казанцев,  
О.В. Кожевников, И.Н. Хиблин,  
А.В. Шматков  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)  
Л.А. Амелин  
(ОАО «НИИЭМ»)

Представлены результаты разработки и создания стенда для статических испытаний платформ малых космических аппаратов. Приведены данные об испытаниях макета универсальной спутниковой платформы УКП-250, изготовленной из сотовпанелей.

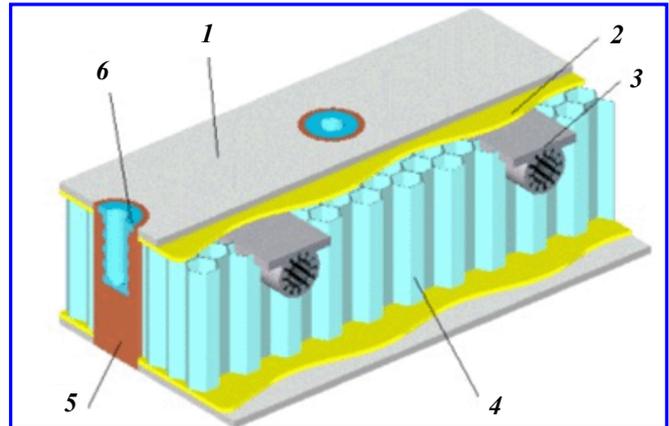
**Ключевые слова:** квалификационные испытания, статическое нагружение, сотовпанель, статическая прочность, несущая способность.

Натурные квалификационные испытания несущей конструкции космических аппаратов (КА) на стенде статических нагружений имеют целью экспериментальное определение способности конструкции создаваемого КА препятствовать статическому воздействию как одному из основных разрушающих факторов, действующих на элементы конструкции КА на стадии активного участка выведения его на орбиту.

В процессе старта ракетносителя (РН) каждый элемент КА испытывает на себе действие силы, определяемой согласно второму закону Ньютона, произведением массы на ускорение ( $F = ma$ ). С увеличением скорости подъёма РН вес элементов конструкции увеличивается пропорционально ускорению. В связи с этим одной из наиболее актуальных проблем при разработке платформ перспективных КА является снижение массы несущей конструкции КА при сохранении высоких прочностных характеристик.

К настоящему времени для решения данной проблемы разработан ряд технологических подходов, в основе которых лежит использование композиционных материалов, в частности сотовпанелей, для создания несущей конструкции. Основными достоинствами сотовпанелей являются:

- высокие демпфирующие свойства (способность поглощать энергию удара);
- низкая удельная масса и высокая стойкость к воздействию внешних механических факторов;



**Рис. 1. Конструкция сотовпанели:** 1 – обшивка; 2 – плёночный клей; 3 – тепловая труба; 4 – сотовплат; 5 – самовспенивающийся клей; 6 – крепёжная втулка

– высокая жёсткость и прочность на сжатие;

– возможность изготовления сотовпанелей с заданными физико-механическими характеристиками и варьирования геометрическими размерами в широком диапазоне.

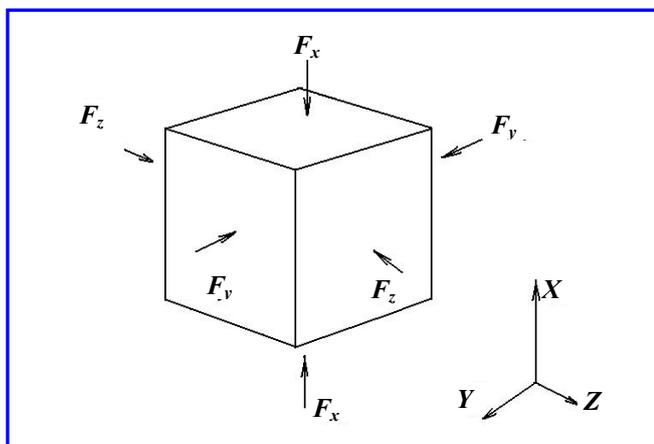
Схематично конструкция типовой сотовпанели представлена на рис. 1.

Процесс испытаний на статическое воздействие заключается в нагружении несущей панели силами, взятыми с заданными коэффициентами запаса по отношению к нагрузкам, реально действующим в процессе эксплуатации КА.

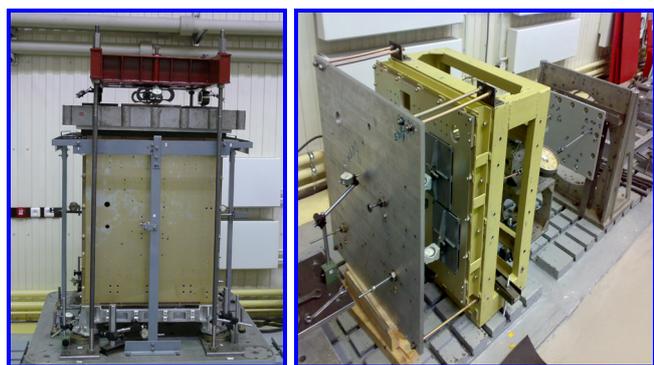
Воздействие статической нагрузки проводят в каждом из трёх взаимно-перпендикулярных направлений ( $X, Y, Z$ ).



Рис. 2. Вид стенда статического нагружения с установленным динамическим макетом универсальной спутниковой платформы УСП-250



а



б

в

Рис. 3. Схема приложения сил к несущей конструкции КА (а); нагружение в вертикальном (б) и горизонтальном (в) направлениях

Значения эксплуатационных нагрузок, действующих на панель КА, напрямую зависят от массы блоков бортовой аппаратуры (БА), закреплённых на сотопанели, и определяются для каждого блока по формуле:

$$N_i = m_i g n,$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го блока;  $g$  – ускорение свободного падения;  $n$  – коэффициент перегрузки (зависит от ускорения в направлении конкретной оси  $X, Y, Z$ ).

Расчётная нагрузка  $i$ -го блока  $F_i$  определяется по формуле:

$$F_i = N_i k,$$

где  $k$  – коэффициент запаса.

Отнесём полученные зависимости к конкретным направлениям действия эксплуатационной силы и получим итоговые формулы для определения расчётных сил, действующих на панель в вертикальном ( $X$ ) и горизонтальных ( $Y, Z$ ) направлениях:

$$F_{ix} = m_i g n_x k;$$

$$F_{iy} = m_i g n_y k;$$

$$F_{iz} = m_i g n_z k.$$

Прочность сотопанели оценивается путём определения величины деформации, целостности в зоне закладных элементов панели (резьбовых втулок) и состояния резьбовых соединений имитаторов блоков с сотопанелью. Критерием оценки прочности панели является совокупность следующих показателей:

- отсутствие остаточной деформации сотопанели в зоне закладных элементов крепления блоков и сотопанели в целом;
- отсутствие признаков разрушения резьбовых соединений;
- отсутствие трещин и отслоений.

Основываясь на данных положениях в 2007 – 2008 гг. в Испытательном центре ФГУП «НПП ВНИИЭМ» был разработан и изготовлен механический стенд вертикального и горизонтального статического нагружения (рис. 2), предназначенный для проведения статических испытаний универсальной спутниковой платформы УСП-250, созданной для разработки перспективных малых КА.

Статические испытания включали два этапа: оценку статической прочности конструкции платформы КА и оценку несущей способности платформы КА.

### Оценка статической прочности конструкции платформы КА

На этом этапе платформа КА подвергалась статическому нагружению путём механического сжатия вдоль трёх взаимно-перпендикулярных направлений  $X, Y, Z$  поочередно с равномерным распределением прикладываемых усилий на панели платформы (рис. 3, а).

Для нагружения вдоль оси  $X$  платформу помещали между двумя пуансонами (рис. 3, б). Нагружение вдоль осей  $Y$  и  $Z$  проводили с помощью тяг, прикреплённых к боковому приспособлению в виде опорной стенки (рис. 3, в).

Прилагаемые усилия измерялись с помощью динамометров, а деформаций в наиболее нагруженных местах (местах наибольшей концентрации напряжений) – с помощью индикаторов деформации (рис. 4).

В процессе испытаний нагружение конструкции проводилось поэтапно, при этом на каждом этапе увеличивалась степень нагружения, и снимались показания величины деформации с установленных индикаторов.

На заключительном этапе проводилась полная разгрузка конструкции платформы КА и повторное снятие показаний величин деформации с индикаторов. Остаточная деформация при этом должна оставаться в пределах заданного допуска.

#### Оценка несущей способности платформы КА

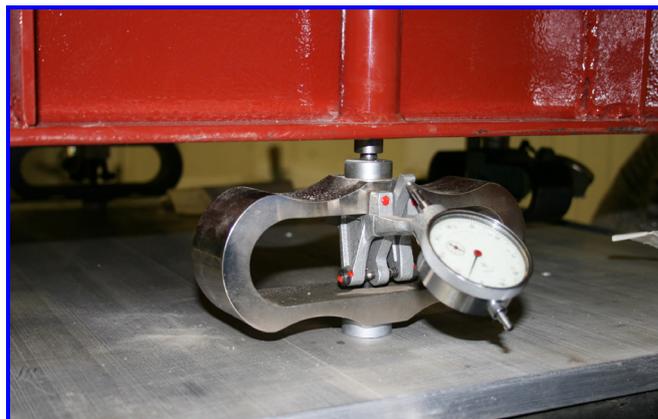
При оценке несущей способности платформы панели крепления полезной нагрузки КА подвергались статическому нагружению, действующему в местах крепления элементов бортовой аппаратуры, поочерёдно вдоль трёх взаимно-перпендикулярных направлений  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 5).

Панель КА жёстко закреплялась на станине испытательного стенда. В качестве блоков БА использовались массогабаритные макеты, установленные на платформе на штатные места полезной нагрузки. С помощью штанг и подсоединённых к ним динамометров создавалась необходимая нагрузка. В местах измерения деформации были установлены индикаторы (рис. 6, 7).

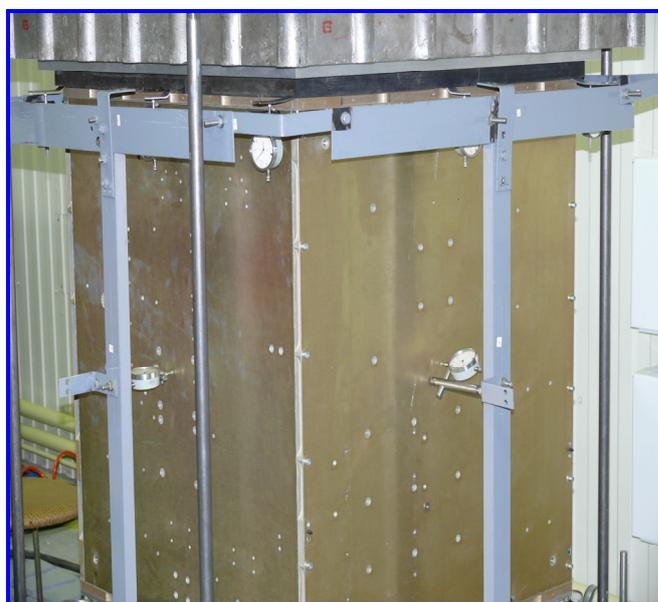
Испытания также проводились поэтапно с увеличением нагружения в местах установки массогабаритных макетов блоков БА. На каждом этапе снимались показания величин деформации с установленных индикаторов. На заключительном этапе панель полностью разгружалась, и производилось повторное снятие показаний величин деформации.

#### Практическое применение стенда для статических испытаний

В качестве примера практического использования созданного стенда в табл. 1 – 4 приведены протокольные данные по испытаниям статической прочности конструкции макета универсальной спутниковой платформы УСП-250.



а



б

Рис. 4. Динамометр с датчиком (а); расположение индикаторов деформации (б)

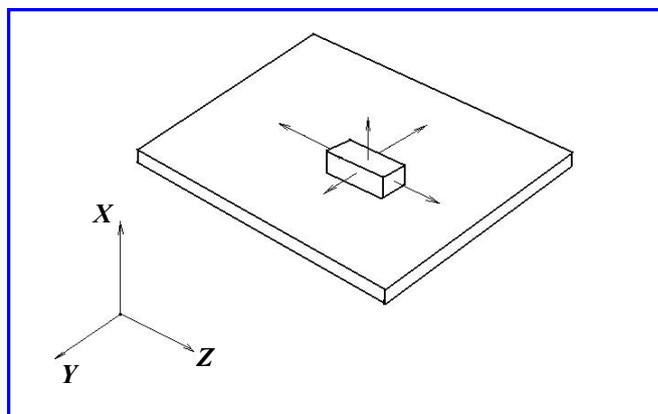


Рис. 5. Схема нагружения закладных элементов креплений на несущей панели

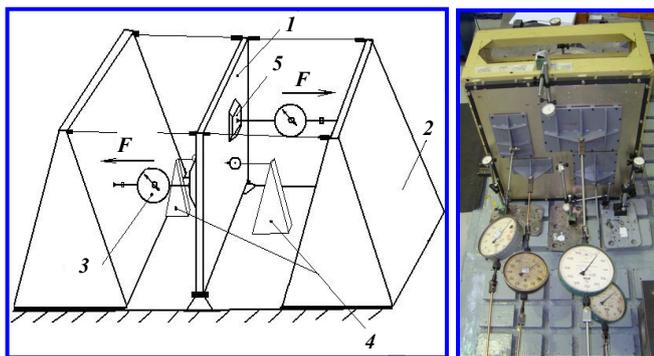


Рис. 6. Схема размещения несущей панели и измерительных индикаторов при радиальном нагружении (а): 1 – сотопанель; 2 – опора; 3 – индикаторы; 4 – динамометр; 5 – массагабаритные макеты блоков БА; вид на динамометры и индикаторы деформации (б)

Таблица 1

Поэтапное изменение величины эксплуатационных нагрузок  $N_i$  при нагружении панели вдоль направления  $Y$

Блок	Нагрузка в % от $N_b$ , кгс						
	40	60	80	100	120	140	150
Блок 1	26	39	52	65	78	90	97,5
Блок 2	12,8	17,2	25,6	32	38,4	44,8	48
Блок 3	12	18	24	30	36	42	45
Блок 4	86	128	171	214	257	300	321

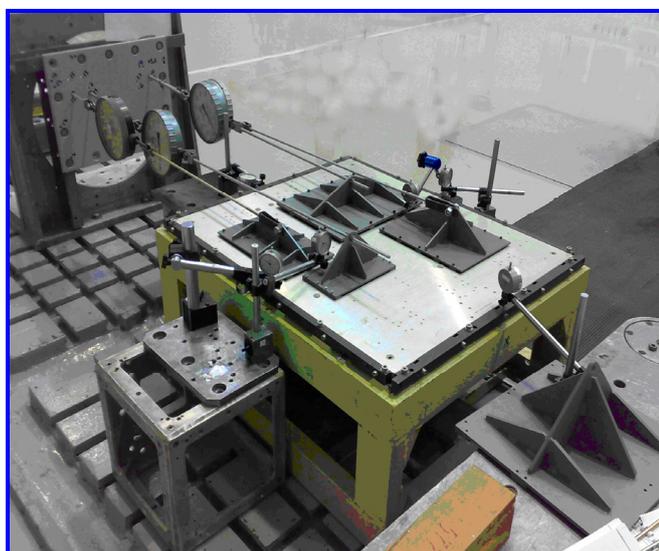


Рис. 7. Вид на динамометры и индикаторы деформации при тангенциальном нагружении несущей панели

Таблица 2

Показания индикаторов деформации при изменении эксплуатационных нагрузок  $N_i$  при нагружении панели вдоль направления  $Y$

№ индикатора	Нагрузка в % от эксплуатационной силы $F_{iy}$									
	0	40	60	80	100	0	120	140	150	0
1	0	1	5	9	14	0	18	23	25	1
2	0	-2	2	6	11	0	15	20	22	1
3	0	2	4	6	8	0	10	12	13	2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	2	11	21	32	0	43	54	58	0
7	0	6	17	29	42	0	52	67	71	0
12	0	3	9	16	24	0	30	39	42	1

Таблица 3

**Поэтапное изменение эксплуатационных нагрузок  $N_i$  и показания динамометров при нагружении панели вдоль направления X**

Нагрузка, кгс	Нагрузка в % от $N_i$	Показания индикаторов динамометров, мм			
		№ 589	№ 695	№ 391	№ 1858
800	20	1350	1321	1307	1274
1600	40	1745	1718	1654	1581
2000	50	1944	1911	1827	1733
2400	60	2140	2107	2001	1877
2800	70	2336	2305	2174	2018
3200	80	2532	2501	2347	2159
3600	90	2727	2697	2521	2303
4000	100	2923	2893	2694	2447
4400	110	3121	3090	2867	2591
4800	120	3319	3286	3041	2736
5200	130	3518	3483	3214	2880
5600	140	3717	3680	3387	3024
6000	150	3916	3876	3561	3168

Таблица 4

**Показания индикаторов деформации при изменении эксплуатационных нагрузок  $N_i$  при нагружении панели вдоль направления Y**

Нагрузка, кгс	Порядковый номер индикатора									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3,45	4,33	3,95	4,06	3,93	5,99	4,42	4,81	0,41	1,45
800	3,50	4,38	3,99	4,18	4,09	6,07	4,57	4,84	0,41	1,47
1600	3,59	4,44	4,05	4,25	4,17	6,15	4,68	4,88	0,42	1,49
0	3,45	4,33	3,96	4,08	3,93	6,01	4,45	4,81	0,41	1,47
1600	3,59	4,44	4,06	4,25	4,17	6,16	4,69	4,88	0,42	1,50
2400	3,67	4,52	4,12	4,33	4,25	6,23	4,795	4,92	0,43	1,51
3200	3,745	4,58	4,18	4,405	4,37	6,315	4,90	4,945	0,43	1,53
4000	3,82	4,64	4,24	4,49	4,495	6,415	5,005	4,975	0,43	1,54
0	3,42	4,32	3,96	4,10	3,93	6,04	4,49	4,81	0,40	1,47
4000	3,83	4,64	4,245	4,495	4,5	6,42	5,01	4,98	0,43	1,55
4400	3,87	4,67	4,28	4,54	4,55	6,53	5,06	4,99	0,43	1,555
4800	3,91	4,71	4,33	4,60	4,655	6,54	5,13	5,01	0,425	1,565
5200	3,945	4,725	4,335	4,615	4,675	6,57	5,165	5,02	0,425	1,565
5600	3,985	4,76	4,37	4,66	4,735	6,615	5,205	5,035	0,43	1,58
6000	4,025	4,795	4,415	4,70	4,79	6,67	5,26	5,05	0,435	1,6
0	3,445	4,34	3,98	4,145	3,95	6,075	4,525	4,815	0,40	1,46

В результате проведённых испытаний по оценке прочности конструкции макета платформы УКП-250 установлено отсутствие остаточных деформаций, трещин и отслоений сотованели и корпуса в целом, а также отсутствие нарушений геометрии корпуса в местах приложения нагрузок и

местах крепления корпуса к адаптеру. Таким образом, созданный стенд для статических испытаний может быть использован для оценки статической прочности конструкции и несущей способности платформ перспективных КА с массой до 670 кг.

*Поступила в редакцию 02.09.2011*

**Евгений Владимирович Афромеев**, начальник отдела,  
т. (495) 365-27-25, e-mail: Eafromeev@rambler.ru.

**Сергей Геннадьевич Казанцев**, д-р техн. наук, заместитель генерального директора –  
генерального конструктора, т. (495) 366-12-01.

**Олег Вячеславович Кожевников**, инженер-конструктор, т. (495) 366-28-38.

**Иван Николаевич Хиблин**, начальник лаборатории,  
т. (495) 366-14-11, e-mail: nilbix@mail.ru.

**Александр Валентинович Шматков**, начальник лаборатории, т. (495) 366-21-01.

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