

УДК 629.783.028.24

Канд. техн. наук В. А. Гонтаровский, А. А. Макаренко, Е. И. Шевцов

## ОТРАБОТКА ДИНАМИКИ ОТДЕЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

*Описано проведение наземных испытаний систем отделения космических аппаратов на функционирование, включающих отработку динамики отделения КА, в процессе которых подтверждается работоспособность системы отделения и определяются параметры, характеризующие динамику отделения.*

*Описано проведення наземних випробувань систем відокремлення космічних апаратів з функціонування, включаючи відпрацювання динаміки відокремлення КА, під час яких підтверджують працездатність системи відокремлення та визначають параметри, які характеризують динаміку відокремлення.*

*The paper describes the spacecraft separation system ground functional tests, including SC separation dynamics refinement, in the process of which the separation system operability is confirmed and the parameters characterizing separation dynamics are determined.*

Разработка высоконадежных систем отделения космических аппаратов (КА) является показателем высокого научно-технического уровня предприятия ракетно-космической отрасли. Одним из завершающих этапов разработки систем отделения является их наземная экспериментальная отработка (НЭО) на функционирование, включающая отработку динамики отделения КА. Целью испытаний является подтверждение высокой работоспособности системы отделения и определение параметров, характеризующих динамику отделения, в частности значения линейных и угловых скоростей, время процесса отделения, реализуемые зазоры.

Сложность проведения наземной отработки системы отделения заключается в том, что в наземных условиях невозможно в полном объеме воспроизвести весь комплекс факторов, действующих на систему отделения в условиях натурального полета. С учетом этого работоспособность элементов системы отделения в натуральных условиях подтверждается комплексом расчетных и экспериментальных работ. Для проведения расчетов динамики отделения КА разрабатываются специальные расчетные методики. В процессе НЭО уточняют или определяют исходные

данные, описывающие взаимодействие КА с элементами системы его крепления и отделения. Такими параметрами являются, например, механический импульс, сообщаемый космическому аппарату при разрыве связей КА с РН, характеристики толкателей, упругие характеристики связей КА с РН и др.

Отработка системы отделения КА проводится в два этапа – автономные и комплексные испытания.

В процессе автономных испытаний:

- элементы системы отделения (пирозамки, толкатели, устройства расстыковки электросоединителей и др.) отрабатывают с учетом всех требований к их применению в натуральных условиях – внешних сил, вибрационных нагрузок, теплового воздействия, крайнего сочетания допусков при изготовлении и т.д.;
- определяют характеристики функционирования элементов системы отделения, такие как время срабатывания, механический импульс, передаваемый на отделяемый объект, характеристики толкателей (усилие, силы сопротивления), коэффициенты трения.

В процессе комплексных испытаний:

- проводят проверку совместного функци-

онирования элементов конструкции, определяют параметры динамики отделения КА в наземных условиях;

- по полученным данным уточняют или определяют необходимые исходные данные для моделирования;
- проводят анализ достоверности расчетных методик.

### Особенности автономных испытаний элементов системы отделения КА

#### Определение механического импульса

Как было сказано, одной из характеристик системы отделения является механический импульс, сообщаемый космическому аппарату при разрыве связей КА с РН [1]. Значение импульса можно условно представить в виде двух составляющих – импульса сил, возникающего непосредственно при срабатывании пиротехнического устройства крепления и действующего на КА, и импульса упругих сил напряженной конструкции, которые возникают при стягивании упругих элементов в местах крепления КА к адаптеру РН.

Для определения механического импульса, сообщаемого отделяемому объекту при срабатывании пирозамка, применяется схема испытаний на маятниковом подвесе (рис. 1). Испытания проводят с макетом, имеющим массу, которая приходится на один пирозамок в штатной конструкции. Крепление макета КА к стенду полностью имитирует штатную конструкцию. Перемещения макета КА регистрируют при помощи специальной системы оптических измерений.

Для определения импульса, передаваемого при разрыве связей при расталкивании близких по значению масс, например бандажных полуколец, применяется схема маятникового подвеса с расталкиванием двух грузов, имеющих требуемые массы.

Для сертификации пирозамков вне зависимости от способа их применения испытания по определению импульса проводят на макете фиксированной массы 50 кг.

Значение импульса определяется по начальной скорости перемещения отделяемого макета КА

$$I = mv_0,$$

где  $m$  – масса макета КА;  $v_0$  – начальная скорость.

Вычисление начальной скорости путем численного дифференцирования перемещения макета дает большую погрешность (рис. 1, в). Поэтому начальная скорость определяется как средняя скорость за промежуток времени

$$\Delta t = 0,2\sqrt{H/g},$$

где  $H$  – высота подвеса макета;  $g$  – ускорение свободного падения,

или по значению максимального отклонения макета (маятника) от начального положения (рис. 1, в)

$$v_0 = \Delta l \sqrt{g/H},$$

где  $\Delta l$  – максимальное отклонение макета.

Значение механического импульса, создаваемого разработанными на ГП «КБ «Южное» пирозамками, составляет 0,25...0,9 кгс·с.

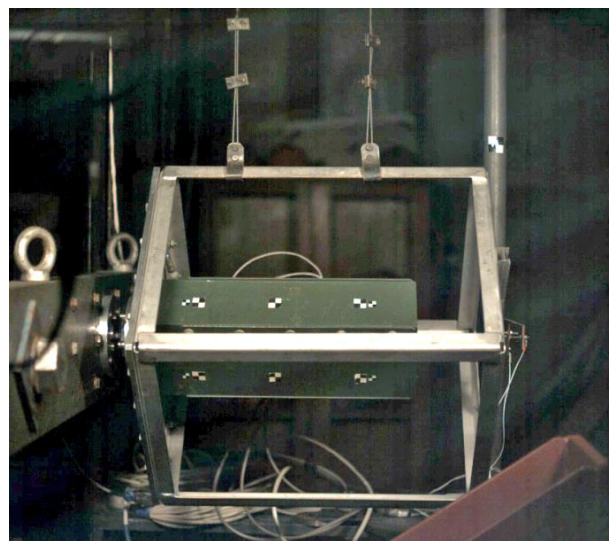
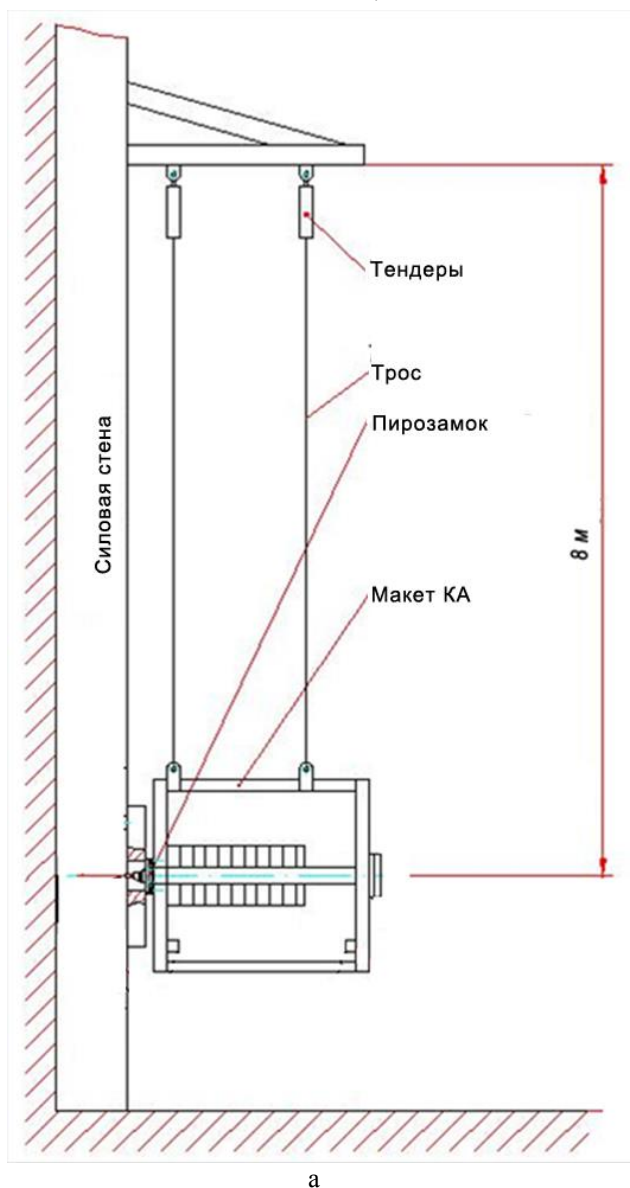
#### Определение характеристик пружинных толкателей

Для определения характеристик пружинных толкателей, отталкивающих КА от РН при отделении, проводят испытания на силовой машине с замером значения усилия толкателя по ходу. При этом определяют усилия при распрямлении и сжатии толкателя. Разность между значениями усилий составляет двойную силу трения в толкателе.

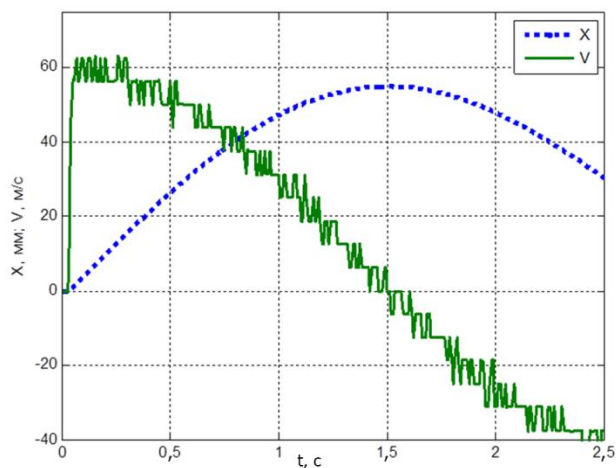
Если пружинные толкатели функционируют в качестве стабилизирующих вращение КА элементов, на них в процессе выдвижения действуют боковые нагрузки, которые могут приводить к потерям полезной работы толкателей до 10...20%. В этом случае определение характеристик пружинных толкателей должно вестись с учетом таких боковых воздействий. Значение максимально возможной боковой нагрузки зависит от текущего осевого усилия толкателя и силы тре-

ния опоры толкателя об опорную площадку КА. Испытания с определением характеристик пружинных толкателей проводится по схеме маятникового подвеса, аналогичной

приведенной на рис. 1. При этом боковая нагрузка создается за счет вертикального смещения макета при движении на маятнике.



б



в

Рис. 1. Испытания по определению механического импульса пирозамка крепления КА: а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции; в – графики перемещения  $X$  и скорости  $V$  макета КА при отделении на маятниковом подвесе, полученные при испытаниях

### Особенности комплексных испытаний системы отделения КА

Схемы проведения комплексных испытаний по отработке динамики отделения КА

разрабатываются с учетом особенностей конструкции КГЧ и необходимости подтверждения в процессе испытаний требований, предъявляемых к параметрам выведения конкретных аппаратов.

Наибольший объем испытаний систем отделения КА потребовался при выполнении контрактов по программам «Глобалстар» и Iridium Next. Особенностью этих проектов были высокие, очень жесткие требования к параметрам отделения КА.

Проект «Глобалстар» предусматривал выведение одним пуском 12 КА на РН «Зенит-2». Аппараты устанавливали в три яруса на диспенсер, выполненный в виде цилиндрической трубы. Каждый КА крепился к диспенсеру при помощи четырех пироприборов. Отделение КА предусматривалось под действием усилий четырех пружинных толкателей. При срабатывании система отделения должна была обеспечить линейную скорость отделения КА с разбросом не более 0,1 м/с и угловую скорость закрутки КА не более 5 °/с. Выполнение таких требований осложнялось следующими особенностями: КА имели существенно смещенную относительно оси симметрии центровку (до 30 мм), что потребовало применить в системе отделения пружинные толкатели, имеющие разные силовые характеристики. Для компенсации угловых возмущений была применена специальная система стабилизации за счет сил трения наконечников толкателей об опорную поверхность КА.

Анализ процесса отделения КА выявил следующие факторы, влияющие на получаемые аппаратом возмущения [2]:

- погрешности изготовления, настройки и установки пружинных толкателей;
- отклонение центра масс КА от расчетного номинала;
- импульс упругих сил, возникающих при потере связи КА с диспенсером (срабатывание пиромеханических узлов крепления КА, «распрямление» стянутых узлами крепления упругих конструкций);
- стабилизация угловых возмущений КА за счет взаимодействия толкателей с опорной поверхностью КА, при этом на толкатели действуют боковые усилия,

приводящие к дополнительным силам трения и потерям энергии.

Для проведения расчетов динамики отделения КА в натуральных условиях необходимо определить следующие исходные данные:

- упругий импульс, возникающий при разрыве связей (срабатывании пироприборов);
- потери полезной работы пружинных толкателей;
- силы трения в месте упора толкателей в КА.

Для подтверждения работоспособности системы отделения, стабилизации угловых возмущений, определения необходимых исходных данных и оценки достоверности расчетных методик были разработаны следующие схемы испытаний:

1. Отделение облегченного макета КА от неподвижно закрепленного в горизонтальной плоскости диспенсера (рис. 2). При этом пружинные толкатели не устанавливаются, что позволяет определить импульс упругих сил, возникающих при разрыве связей КА с диспенсером РН.

2. Отделение специальных макетов КА на маятниковом подвесе (рис. 3), благодаря чему можно оценить угловые возмущения вокруг вертикальной оси и определить потери полезной работы толкателей при их функционировании в составе системы отделения.

3. Отделение макетов КА с имитацией невесомости (рис. 4) для комплексного исследования работы системы отделения КА.

Для определения параметров отделения КА применяли две системы измерения, дополняющие друг друга, – телеметрическую и оптическую. В состав системы телеметрических измерений входили датчики угловых скоростей и линейных ускорений. Система оптических измерений включала в себя скоростные видеокамеры, фиксирующие траекторию перемещения реперных точек макета КА.

### **Определение импульса упругих сил**

Для определения механического импульса, создаваемого упругими силами при разрыве связей КА с диспенсером, проводилось отделение макета КА меньшей массы от неподвижно закрепленного в горизонтальной плоскости диспенсера (рис. 2).

Движение макета только под действием силы тяжести описывается квадратным уравнением. Для определения начальной скорости отделения по данным оптических измерений строится график зависимости перемещения КА по времени (рис. 2, в).

Методом наилучшего приближения

определяются коэффициенты квадратного уравнения ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), описывающие движение точки под действием силы тяжести [3]:

$$x = at^2 + bt + c,$$

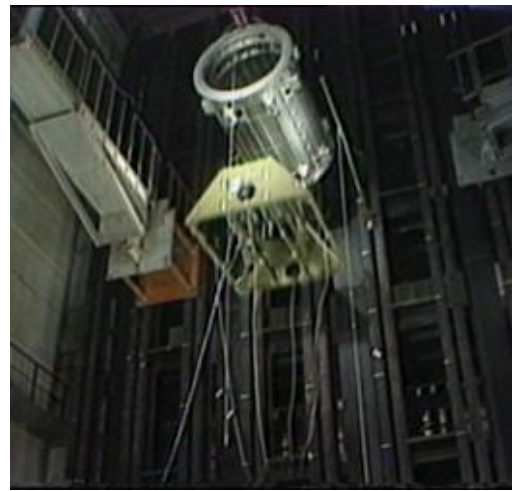
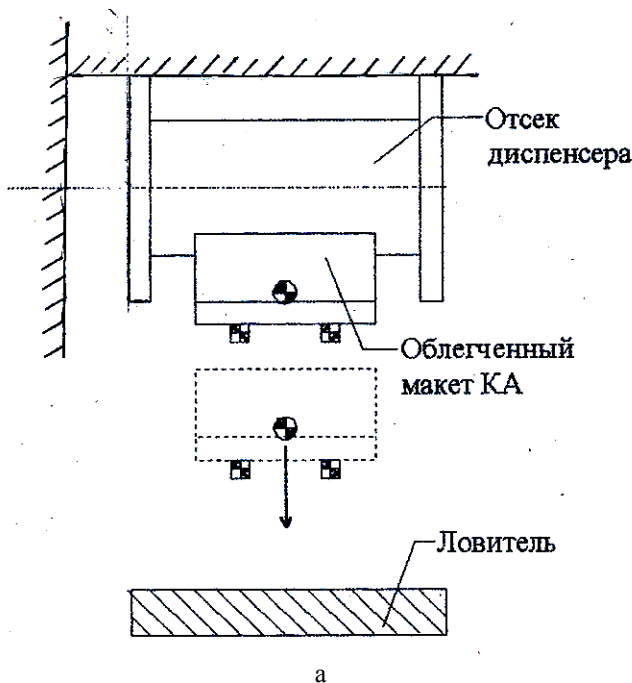
после чего находят начальную скорость отделения макета КА

$$v_0 = \sqrt{b^2 - 4ac}$$

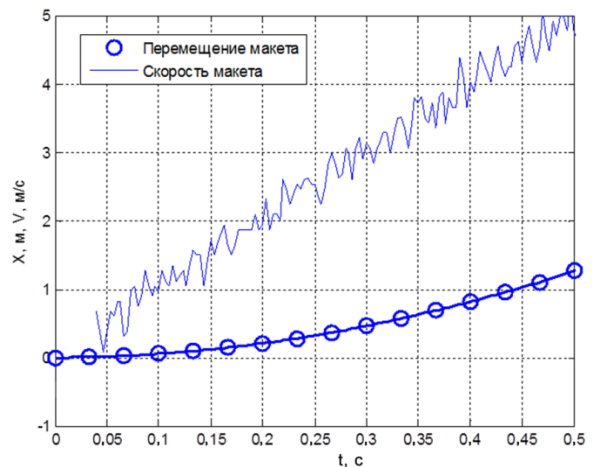
и значение импульса

$$I = mv_0,$$

где  $m$  – масса макета КА.



б



в

Рис. 2. Испытания по отделению макета КА от неподвижно закрепленного диспенсера: а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции; в – графики вертикального перемещения  $X$  и скорости  $V$  макета КА, полученные при испытаниях

Для графика перемещения (рис. 2, в) коэффициенты квадратного уравнения  $a = 4,9043$ ;  $b = 0,0892$ ;  $c = -0,0054$ .

Значение начальной скорости  $v_0 = 0,338$  м/с.

На рис. 2, в для сравнения также приведен график скорости макета КА, определенный численным дифференцированием графика перемещений. Как видно, погрешность определения начальной скорости методом численного дифференцирования велика.

Использование для определения механического импульса макета КА меньшей массы объясняется следующим. Штатный КА имеет большие значения массы и моментов инерции, и при его отделении реализуются малые значения угловых и линейных скоростей (менее  $0,5$  °/с и  $0,005$  м/с), которые соизмеримы со значением погрешности средств измерения. Для получения достаточной точности определения возмущений при отделении требуется проведение большого количества испытаний (10...15) с последующей статистической обработкой [3]. Для уменьшения количества испытаний и

повышения достоверности получаемых результатов испытания проводились с макетом КА меньшей массы. Это позволило получить заведомо большие значения возмущений и уточнить исходные данные и расчетные методики.

В процессе НЭО системы отделения КА «Глобалстар» было проведено пять таких испытаний. Полученное значение механического импульса при отделении КА составило  $0,255...0,61$  кгс·с. С учетом значения импульса, передаваемого пиропристроями крепления КА, импульс, возникающий за счет упругости конструкции диспенсера, не превышает  $0,2$  кгс·с.

### Определение потерь полезной работы толкателей и исследование процесса отделения КА

Для исследования процесса отделения КА и определения возможных потерь полезной работы пружинных толкателей была применена схема испытания с отделением макета КА на маятниковом подвесе (рис. 3).

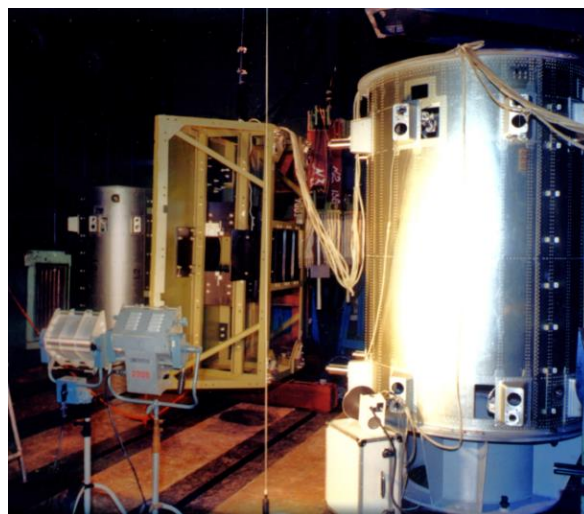
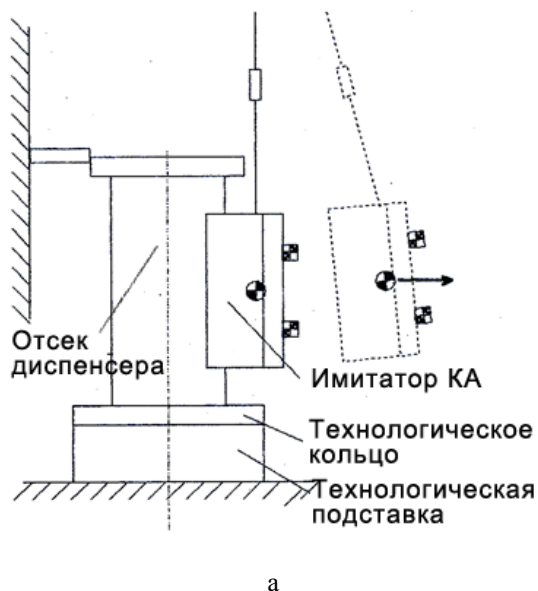


Рис. 3. Испытания по отделению макета КА на маятниковом подвесе:  
а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции

Испытания на маятниковом подвесе позволили проверить эффект системы стабили-

зации угловых возмущений вокруг вертикальной оси, для которой момент инерции КА является минимальным, а чувствительность КА к внешнему возмущающему воздействию – максимальной.

В процессе испытаний использовались специальные макеты КА, масса и моменты инерции которых соответствовали штатным. При этом положение центра масс макета КА могло изменяться относительно

штатного номинального положения. Для имитации крайних режимов работы проводили специальные настройки опытной конструкции:

- устанавливали положения координат центра масс – номинальное и максимальное расчетное ( $\pm 10$  мм);
- устанавливали пружинные толкатели с максимально возможными разбросами усилий ( $\pm 5\%$ ) и перекосом линии действия силы ( $\pm 30'$ );
- имитировали максимально возможную неплоскостность стыкуемых поверхностей (разновысотность мест крепления КА до 0,2 мм).

Всего были проведены 24 испытания. Линейные скорости отделения определяли при помощи системы оптических измерений по методике, описанной выше.

Для исследования процесса стабилизации угловых возмущений КА и определения значений угловых скоростей макета КА использовались датчики системы телеметрических измерений. Сложность обработки показаний датчиков угловых скоростей заключается в том, что ожидаемые значения угловых скоростей малы и для их измерений применяются чувствительные датчики с малым диапазоном измерений.

Это приводит к тому, что датчики фиксируют в том числе и угловые скорости, вызываемые собственными колебаниями платы, на которой они установлены. Поэтому проводилась обработка данных с помощью фильтра Фурье (рис. 4, в). Дополнительно для оценки корректности обработки

данных использовали результаты оптических измерений. По перемещениям реперных точек определяли угол разворота макета КА и среднюю угловую скорость.

### **Комплексное исследование взаимодействия элементов системы отделения КА**

Испытания системы отделения на маятниковом подвесе не позволяют оценить взаимодействие всех элементов системы стабилизации угловых возмущений КА. Это объясняется наличием ограничений по вращению макета КА в плоскости маятникового подвеса и влиянием восстанавливающего момента от силы тяжести, что приводит к увеличению боковых нагрузок на толкатели. Для оценки процесса взаимодействия элементов системы отделения в условиях, максимально близких к штатным, были проведены испытания по отделению макетов КА с имитацией невесомости. В процессе испытаний от стендового кронштейна отделялся фрагмент диспенсера с макетами КА (рис. 4), через 0,1 с производилось отделение макетов КА от свободно падающего фрагмента диспенсера.

Было проведено восемь испытаний. Результаты испытаний подтвердили полученные ранее данные по параметрам отделения КА и эффективности работы системы стабилизации угловых возмущений. Потери полезной работы толкателей за счет исключения влияния лишних связей уменьшились на  $\sim 1,5\%$ .

Результаты испытаний показали следующее:

- потери полезной работы пружинных толкателей в условиях функционирования в составе системы отделения не превысили 6% (при заложенных ограничениях 10%);
- заданные линейные скорости отделения КА были обеспечены с разбросами не более 0,04 м/с, или 5%, при допустимых  $< 0,1$  м/с;

- угловая скорость КА при всех крайних неблагоприятных сочетаниях внешних факторов не превышает  $2,2^\circ/\text{с}$  при допустимой  $<5^\circ/\text{с}$ .

По результатам испытаний была подтверждена правильность и высокая точность математической модели расчета динамики отделения КА. Отклонения расчетных значений скоростей отделения КА от фактически полученных составили:

- для линейных скоростей отделения – не более  $0,008 \text{ м/с}$ ;
- для угловых скоростей – не более  $0,55^\circ/\text{с}$ .

### **Особенности отработки динамики отделения КА Iridium Next**

Особенность системы отделения КА Iridium Next заключается в их отделении от предварительно развернутых упругих диспенсеров (рис. 5, б), совершающих затухающие колебания. Применение системы отделения с разворотом диспенсеров было обусловлено необходимостью размещения на РН «Днепр» двух КА больших габаритов с учетом ограничений зоны полезного груза.

Разворот диспенсеров осуществляется специальным гидравлическим приводом.

После разворота диспенсеров осуществляется поочередное отделение КА.

Требования к параметрам отделения КА очень жесткие. Особенно критичным являлось ограничение угловой скорости КА после отделения ( $\leq 3^\circ/\text{с}$ ). Трудность выполнения этого ограничения связана с особенностью конструкции системы отделения и условиями отделения. Одним из определяющих факторов, влияющих на угловые скорости отделения КА, являются слабозатухающие колебания диспенсеров, возникающие в процессе их разворота и остановки. При отделении КА получает угловую скорость диспенсера и с ней суммируется угловая скорость, возникающая непосред-

ственно за счет срабатывания системы отделения. Для уменьшения возмущений необходимо сделать временную задержку до допустимого затухания колебаний диспенсеров за счет диссипации энергии в конструкции. При этом отделение КА от диспенсера в условиях полета необходимо произвести с минимально возможной временной задержкой, так как на аппарат воздействуют газодинамические и тепловые нагрузки двигательной установки, приводящие к его недопустимому нагреву. В процессе испытаний необходимо определить параметры колебания диспенсеров – амплитуду, частоту и декремент затухания – и найти оптимальное время отделения КА.

Для подтверждения работоспособности системы отделения КА была применена следующая схема отработки динамики отделения:

1. Автономные испытания входящих в систему отделения КА подсистем – пиротехнических узлов крепления КА, пиромеханизмов отстыковки электросоединителей, гидравлических приводов разворота диспенсеров. В результате испытаний были определены параметры функционирования этих подсистем с учетом крайних возможных сочетаний внешних воздействий. Автономные испытания пиромеханизмов проводились по традиционным схемам, описанным выше, с определением значений механического импульса (рис. 1).

2. Комплексные испытания на функционирование системы разворота диспенсеров. В результате были определены параметры колебаний диспенсеров после разворота – собственная частота колебаний, амплитуды угловой скорости, декремент затухания колебаний (рис. 6).

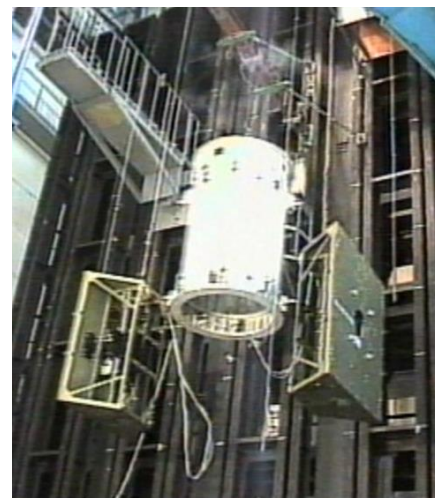
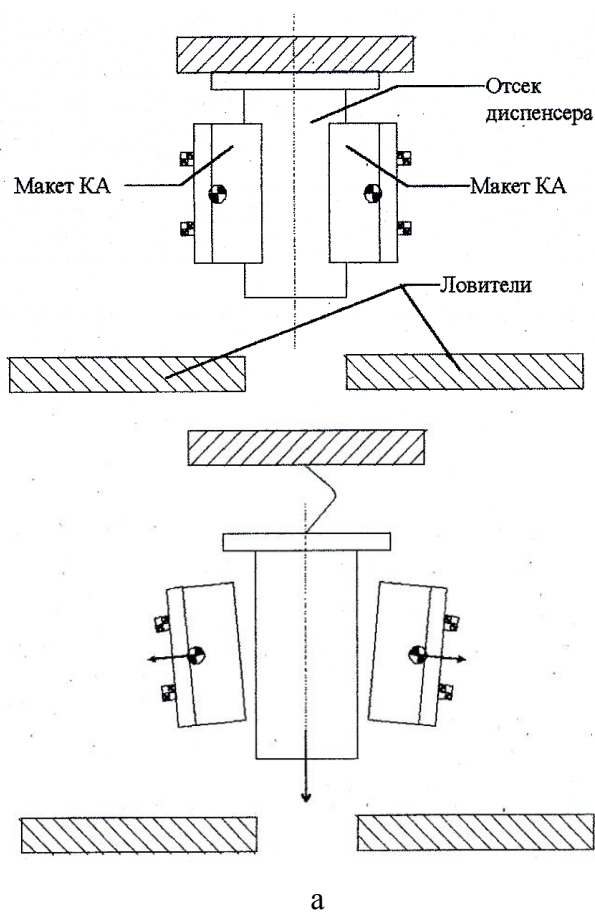
3. Комплексные испытания системы отделения КА со специальными облегченными макетами КА. В результате были определены упругие импульсы системы разделения и малые по значению предель-



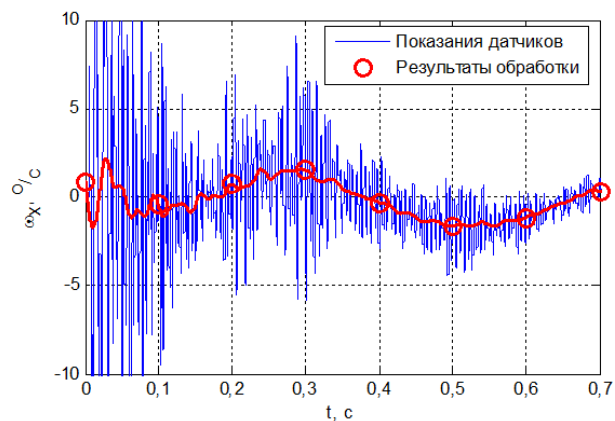
ные для системы измерений угловые возмущения. Полученные данные позволили подтвердить методику расчета динамики отделения КА от упругих диспенсеров.

4. Комплексные испытания системы отделения КА с макетами КА, имеющими близ-

кие к штатным массово-центровочные и инерционные характеристики. В результате непосредственным экспериментом были уточнены значения возмущений, которые КА получает за счет процесса отделения.



б



в

Рис. 4. Испытания по отделению макетов КА с имитацией невесомости: а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции; в – графики угловой скорости макета КА, полученные при испытаниях

### Испытания системы разворота диспенсеров

Для испытаний системы разворота диспенсеров была разработана специальная схема нагружения (обезвешивания) КА, что позволяло имитировать близкое к штатному

внешнее воздействие на систему разворота (рис. 5). Система нагружения состояла из трособлочной системы с грузами, которая крепилась при помощи пиротехнического устройства (пиростяжки) к диспенсеру. После разворота диспенсеров на расчетный угол система обезвешивания отстрелива-

лась и диспенсеры с КА осуществляли свободные колебания (рис. 5). Параметры колебаний (угол разворота и угловую скорость) фиксировали системы телеметрических и оптических измерений. На основе анализа полученных данных определялись:

$A_0$  – амплитуда угловой скорости на момент окончания разворота диспенсера (после отстрела пиростяжки, рис. 5, з);

$d$  – декремент затухания колебаний

$$d = \frac{1}{N} \ln \frac{A_0}{A_N},$$

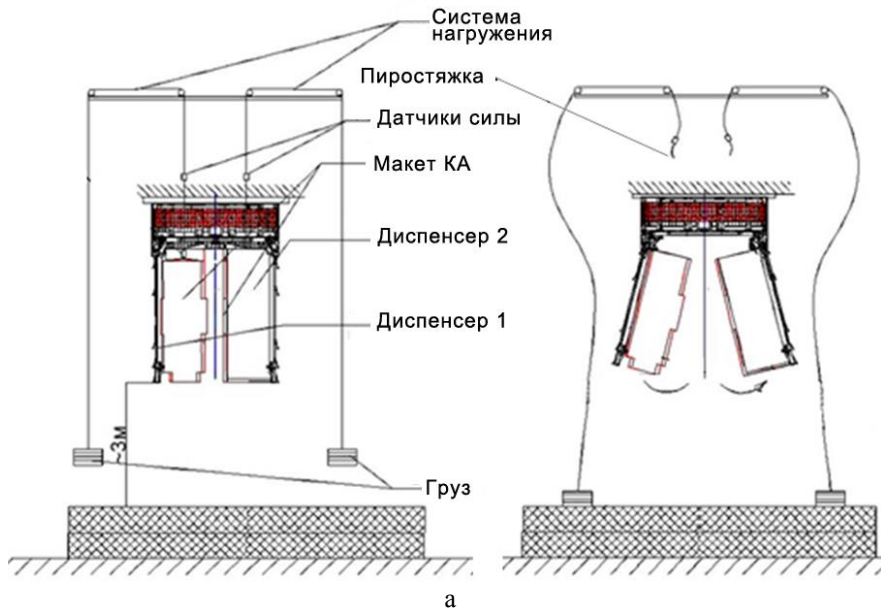
где  $N$  – количество колебаний;  $A_N$  – амплитуда последнего колебания.

Для графика, приведенного на рис. 5, з,  $A_0=2,675$ ;  $A_N=0,4943$ ;  $N=10$ ;  $d=0,169$ .

По результатам испытаний было предложено проводить отделение КА через 5 с после разворота диспенсера. За это время амплитуда угловой скорости диспенсера с КА уменьшается до допустимых величин  $\pm 0,4^\circ/\text{с}$ .

### Комплексные испытания системы отделения КА

Комплексные испытания системы отделения КА проводили по схеме отделения от развернутого неподвижного диспенсера и движения под действием силы тяжести (рис. 6).



б

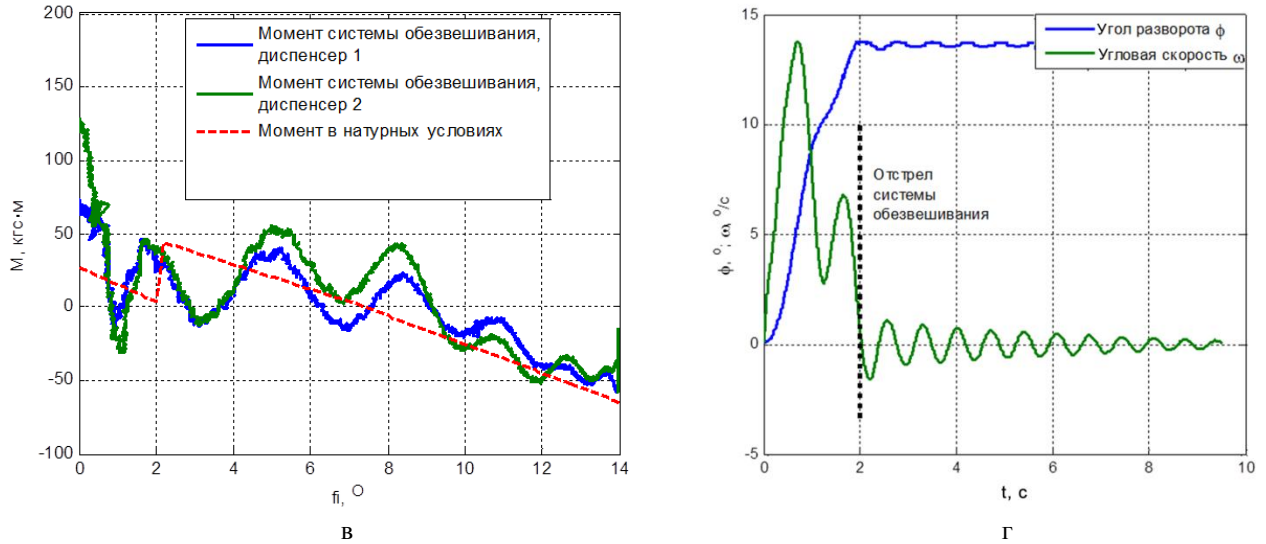
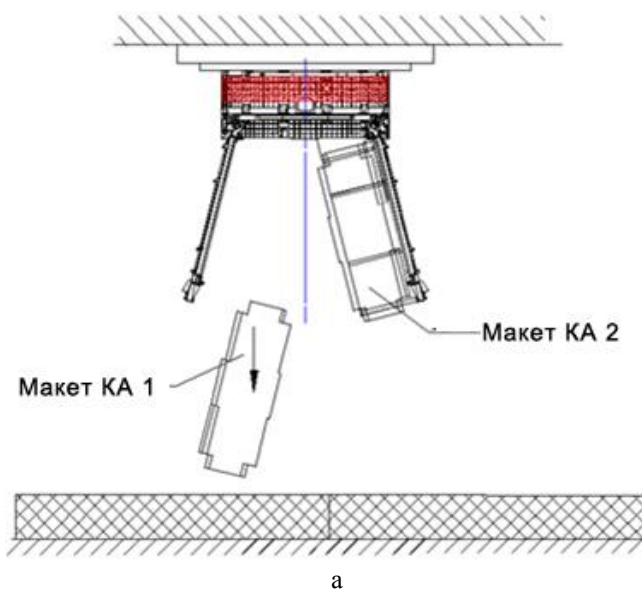


Рис. 5. Испытания системы разворота диспенсеров:  
 а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции; в – графики внешнего момента, действующего на диспенсеры в натуральных условиях и условиях испытаний;  
 г – графики угла разворота и угловой скорости диспенсера в процессе испытаний

Получение информации о параметрах отделения осуществлялось при помощи систем телеметрических и оптических измерений для каждого макета КА. Датчики угловых скоростей и линейного ускорения были установлены на специальной плате в районе центра масс макета КА. В процессе отделения КА регистрировались угловые скорости разворота макета КА вокруг осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ .

Система видеоизмерений фиксировала линейные координаты реперных точек макета КА и его угловое положение в процессе отделения, по которым определяли соответствующие линейные и угловые скорости.

Для обработки показаний датчиков угловых скоростей макетов КА применялись фильтры Фурье. На рис. 6, в приведены графики исходных значений и результаты обработки.



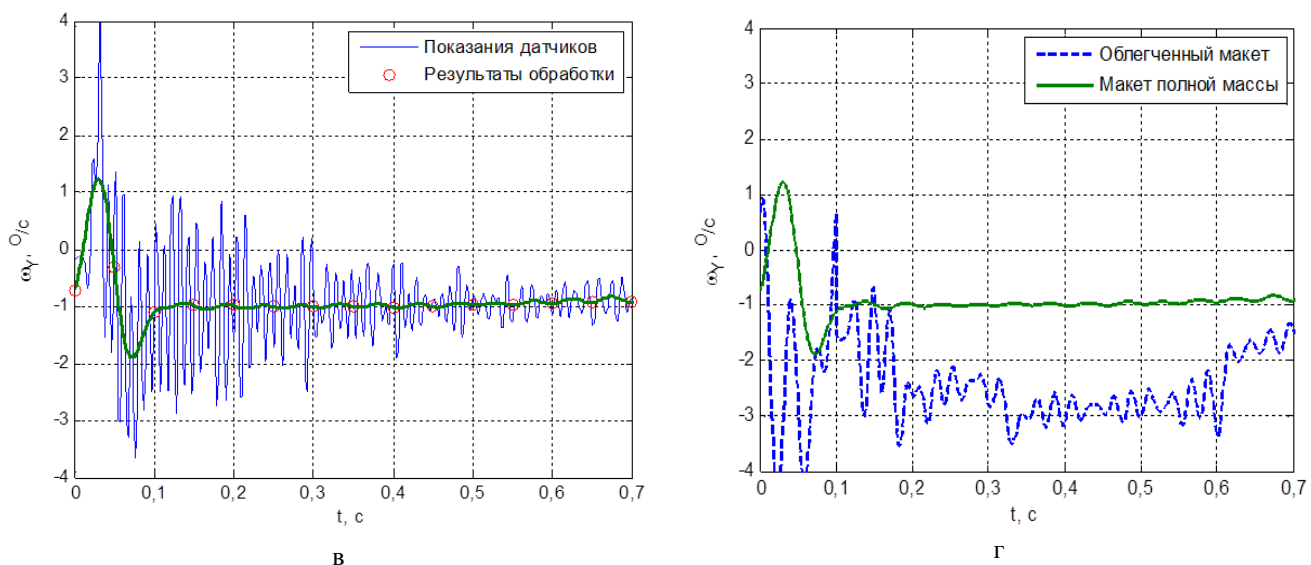


Рис. 6. Испытания по отделению макета КА от неподвижного диспенсера:  
 а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции;  
 в – графики угловой скорости макета КА, зафиксированные датчиками при испытаниях и обработанные; г – обработанные графики угловых скоростей облегченного макета КА и макета полной массы

Для определения параметров системы отделения, как и при работах по программе «Глобалстар», применялись две схемы испытания – отделение облегченного макета КА и макета КА, имеющего массово-инерционные характеристики, соответствующие штатному аппарату.

Полученные в результате испытаний значения угловых и линейных скоростей приведены в таблице.

Параметры отделения КА

Макет КА	Линейная скорость отделения, м/с	Угловая скорость отделения, °/с
Облегченный: – фактические значения; – расчетные значения	0,037 0,026	1,85±0,8 2,07
Полной массы: – фактические значения; – расчетные значения	0,004 0,006	0,84±0,18 0,83

Комплекс проведенных работ позволил уточнить настройки и циклограмму срабатывания системы отделения и обеспечить

выполнение требований заказчика к допустимым возмущениям КА за счет процесса отделения.

**Заключение**

Разработанная на ГП «КБ «Южное» методология проведения испытаний систем отделения космических аппаратов на функционирование позволяет с высокой точностью и достоверностью отработать динамику отделения КА в наземных условиях.

**Список использованной литературы**

1. Кобелев В. Н., Милованов А. Г. Средства выведения космических аппаратов. – М.: Рестарт, 2009. – 528 с.
2. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов / Под ред. В. П. Мишина. – М.: Машиностроение, 1991. – 415 с.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 376 с.

Статья поступила 23.08.2017