

С. В. Борзых, В. В. Воронин

## ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОСАДОЧНОГО УСТРОЙСТВА ВОЗВРАЩАЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОСАДОЧНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Предложен подход к рациональному выбору энергетических характеристик амортизатора трансформируемого механического посадочного устройства возвращаемого космического аппарата в рамках конструктивных ограничений, а также ограничений по перегрузкам, клиренсу, устойчивости. Разработана модель динамики движения такого аппарата с момента контакта с посадочной поверхностью. Корпус возвращаемого космического аппарата и элементы его посадочного устройства рассматриваются как структурно сложная механическая система с внутренними связями.*

**E-mail:** elenanik7@mail.ru; vitaliyvoronin@gmail.com

**Ключевые слова:** возвращаемый космический аппарат, динамика посадки, механические связи, энергетическая характеристика, посадочная поверхность, перегрузка, устойчивость движения.

Для многих типов возвращаемых космических аппаратов (ВКА) характерным является наличие посадочного устройства, функционирующего с момента первого контакта с поверхностью до полной остановки ВКА. Особенностью данного этапа процесса посадки является необходимость гашения большой кинетической энергии, которой обладает ВКА в этот момент. Большая часть энергии ВКА предварительно гасится на участке спуска. Для планет с атмосферой гашение энергии происходит за счет сил аэродинамического сопротивления (баллистические траектории), использования парашютных систем, надувных тормозных устройств и т.д. [1, 2]. На планетах без атмосферы для предварительного гашения скорости перед контактом с поверхностью используются тормозные двигатели [3–6]. Однако к моменту контакта с поверхностью ВКА обладает некоторыми остаточными линейными и угловыми скоростями, которые и гасятся в процессе движения и взаимодействия ВКА с поверхностью до полной остановки [7]. В момент полной остановки конечное положение должно обеспечить дальнейшее функционирование аппарата (развертывание научной аппаратуры для проведения исследований, спуск автоматического планетохода, выход экипажа и т.д.).

**Постановка задачи.** Выбор характеристик посадочных устройств — это громоздкая оптимизационная задача, требующая рассмотрения случаев посадки во всем диапазоне разброса кинематических параметров аппарата (линейных и угловых скоростей), углов подхода, свойств

грунта [8–12], сравнения возможных различных типов посадочных устройств и т.д. Обоснованность принятых технических решений и конкретных характеристик посадочного устройства подтверждается как расчетно-теоретическим анализом, так и экспериментами.

Процесс мягкой посадки отрабатывается на наземных экспериментальных установках, как правило, маятникового типа, позволяющих моделировать в реальных диапазонах сочетание вертикальной и горизонтальной компонент скорости. Предусматривается возможность смены грунтов на специально подготавливаемой площадке, задание разного наклона посадочной плоскости и некоторые другие возможности [4].

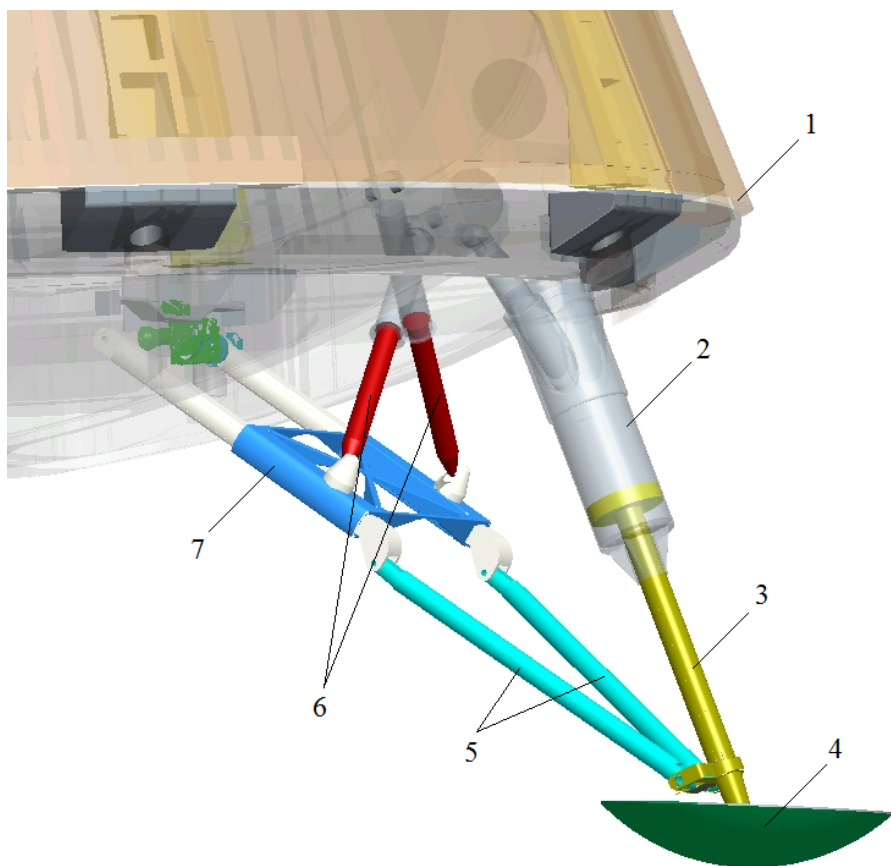
Тем не менее возможности наземной экспериментальной отработки ограничены, поскольку на установках не удастся в полной мере воспроизвести реальные условия посадки (например, отличную от земной гравитацию, освещенность и т.д.) и все многообразие сочетаний начальных условий в момент контакта с поверхностью. Эксперименты, как правило, проводятся на масштабных моделях, и результаты пересчитываются с помощью теории подобия.

В силу ряда обстоятельств (погрешностей системы управления спуском, порывов ветра, неточного знания ряда характеристик самого ВКА и др.) кинематические параметры ВКА лежат в некотором диапазоне. Кроме того, ориентация посадочной поверхности и ее физико-механические свойства могут быть случайными (а иногда непредсказуемыми).

**Конструкция посадочной опоры.** Трансформируемое механическое посадочное устройство включает в себя четыре посадочные опоры с равномерным азимутальным расположением опор через  $90^\circ$ . Все четыре опоры, в состав которых входят стойки-амортизаторы, сходящиеся в виде треноги к тарели, которая непосредственно контактирует с поверхностью, одинаковы по конструкции (рис. 1).

Кинематическая схема и размеры принимались с учетом зоны размещения посадочной опоры в агрегатном отсеке ВКА, причем изначально посадочная опора находится в сложенном состоянии. Процесс приведения опоры из сложенного в раскрытое положение, готовое к контакту с поверхностью, показан на рис. 2. Стоит подчеркнуть, что, отмеченные на рис. 1 откидная рама и раздвижные упоры являются элементами корпуса ВКА и не входят в динамическую модель системы как отдельные тела.

**Динамическая модель системы.** Движение ВКА с механическим посадочным устройством моделируются системой тел, состоящей из центрального тела (корпуса ВКА) и амортизаторов, один конец которых крепится к корпусу, а другой — к тарели, непосредственно контактирующей с посадочной поверхностью (см. рис. 1). Число тарелей



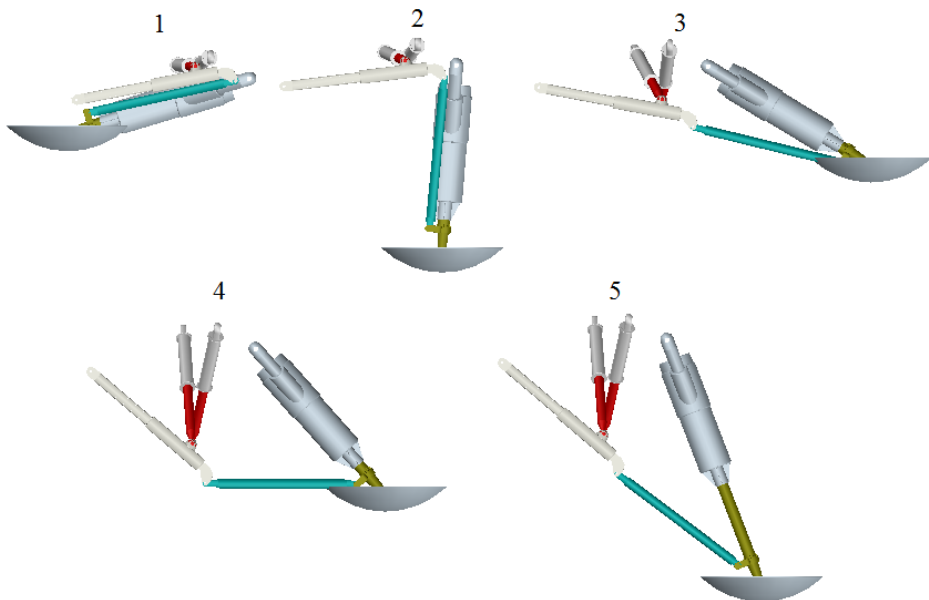
**Рис. 1. Схема посадочной опоры:**

1 – корпус аппарата; 2 – стойка; 3 – шток; 4 – тарель, 5 – подкосы, 6 – раздвижные упоры, 7 – откидная рама

$k$  обычно выбирается равным 3 или 4. К каждой тарели сходится от корпуса три амортизатора (число амортизаторов, подходящих к  $k$ -й тарели, обозначим  $j$ ; иногда один или два амортизатора в треноге могут быть заменены жесткими стержнями) [13].

Каждый  $j$ -й амортизатор  $k$ -й тарели считается состоящим из штока и стойки; внутри последней, как правило, находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты) [14].

Необходимо подчеркнуть, что значение хода обжатия амортизатора практически не является оптимизируемой величиной, поскольку лежит в очень узком диапазоне, жестко задаваемом располагаемым компоновочным объемом, схемой укладки и раскрытия посадочных опор. Рационально можно выбрать в основном профиль изменения силы амортизатора в зависимости от располагаемого хода. Такого рода анализ, особенно если он проводится на начальных стадиях разработки ВКА, может быть осуществлен только путем математического моделирования динамики процесса посадки с проведением большого объема оптимизационных расчетов.



**Рис. 2. Процесс раскрытия посадочной опоры:**

1 – сложенное состояние; 2–4 – промежуточные положения процесса раскрытия; 5 – раскрытое положение

Модель построена следующим образом. Корпус ВКА, стойки, штоки, тарели рассматриваются как структурно сложная механическая система тел с внутренними связями, характер которых отвечает имеющимся степеням свободы в точках взаимодействия отдельных тел.

Для разработки модели вводятся правые системы координат: инерциальная и связанные с центрами масс тел системы. Для каждого  $i$ -го тела (корпуса ВКА,  $k$ -й тарели,  $k, j$ -й стойки и штока) записываются уравнения движения центра масс (в инерциальной системе координат) и вращения относительно центра масс (в связанной системе координат тела):

$$m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i; \quad (1)$$

$$[J_i] \vec{\varepsilon}_i + \vec{\omega}_i \times ([J_i] \vec{\omega}_i) = \vec{L}_{0i}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер тела,  $m_i$  – масса,  $\vec{a}_i$  – вектор ускорения,  $\vec{F}_i$  – вектор сил, действующих на тело,  $[J_i]$  – тензор инерции тела,  $\vec{\varepsilon}_i$  – вектор ускорения,  $\vec{\omega}_i$  – вектор угловой скорости,  $\vec{L}_{0i}$  – вектор моментов относительно центра масс тела, где 0 – обозначает центр масс.

Помимо сил тяжести и сил реакций связей в выражения главных векторов сил и моментов входят: для корпуса ВКА – силы тяги тормозных или прижимных двигателей (в случае их наличия); для стойки и штока – сила сопротивления амортизатора, для тарели – сила взаимодействия с грунтом.

**Уравнения связей.** Уравнения движения (1), (2) не могут быть сразу проинтегрированы, поскольку кроме перечисленных силовых

факторов в них входят неизвестные силы и моменты реакций связи. Для определения реакций связи в точках контакта корпус ВКА– $k$ ,  $j$ -стойка,  $k$ ,  $j$ -стойка– $k$ ,  $j$ -шток,  $k$ ,  $j$ -шток– $k$ -тарель записываются дополнительные уравнения связи.

Корпус ВКА и  $k$ ,  $j$ -я стойка соединены связью в виде сферического шарнира, запрещающего в точке связи линейные относительные перемещения. В соответствии с предложенным в настоящей статье подходом движение каждого тела рассматривается отдельно. Тогда действие  $k$ ,  $j$ -й стойки на корпус ВКА учитывается в виде пространственной реакции (трех ее неизвестных проекций на какие-либо координатные оси). На стойку со стороны корпуса ВКА действует сила, равная по модулю и противоположная по направлению. Уравнение для определения этой силы реакции связи основано на условии нерасхождения шарнирной точки контакта корпуса ВКА и  $k$ ,  $j$ -й стойки (далее индекс  $k$ ,  $j$  опускается, рис. 3):

$$\vec{r}_{\text{кор}} + \vec{r}_{\text{кор-ст}} = \vec{r}_{\text{ст}} + \vec{r}'_{\text{ст-кор}},$$

где  $\vec{r}_{\text{кор}}$ ,  $\vec{r}_{\text{ст}}$  – радиусы-векторы, определяющие положение центров масс соответственно корпуса ВКА и стойки в инерциальной системе координат,  $\vec{r}'_{\text{кор-ст}}$ ,  $\vec{r}_{\text{ст-кор}}$  – радиусы-векторы, определяющие положение точки контакта в связанных системах координат каждого тела.

Векторное равенство можно дважды продифференцировать, так как при общей точке контакта ее полная скорость и ускорение в инерциальной системе координат одинаковы для корпуса ВКА и стойки в

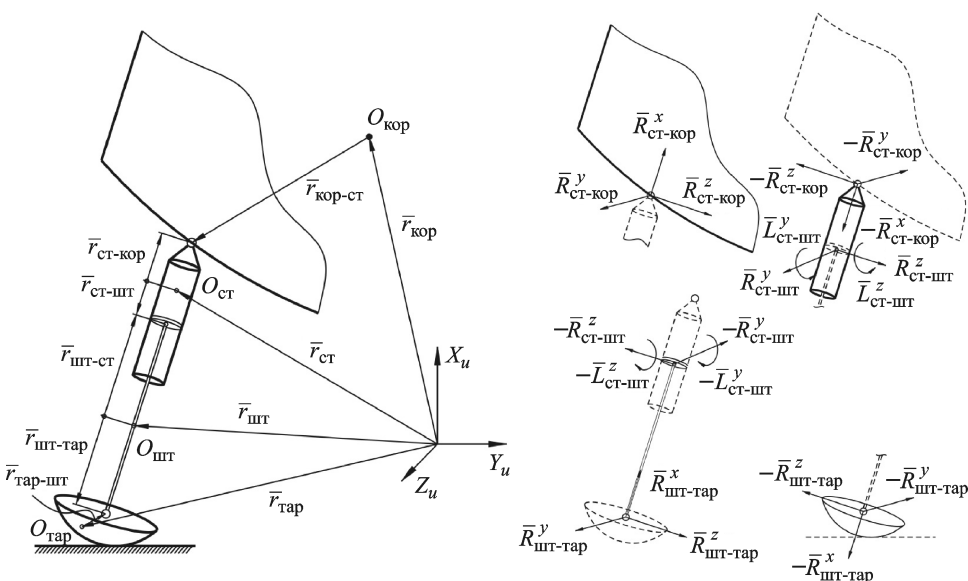


Рис. 3. Расчетная схема опоры посадочного устройства и структура векторов реакций связей опоры посадочного устройства

произвольный момент времени:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{\text{кор}} + \vec{\varepsilon}_{\text{кор}} \times \vec{r}_{\text{кор-ст}} + \vec{\omega}_{\text{кор}} \times (\vec{\omega}_{\text{кор}} \times \vec{r}_{\text{кор-ст}}) = \\ = \vec{a}_{\text{ст}} + \vec{\varepsilon}_{\text{ст}} \times \vec{r}_{\text{ст-кор}} + \vec{\omega}_{\text{ст}} \times (\vec{\omega}_{\text{ст}} \times \vec{r}_{\text{ст-кор}}). \end{aligned} \quad (3)$$

Из (1) и (2) можно выразить линейные ускорения центра масс и угловые ускорения корпуса и стойки:

$$\vec{a}_{\text{кор}} = m_{\text{кор}}^{-1} \left( \vec{F}_{\text{кор}} + \vec{R}_{\text{ст-кор}} \right); \quad (4)$$

$$\vec{a}_{\text{ст}} = m_{\text{ст}}^{-1} \left( \vec{F}_{\text{ст}} - \vec{R}_{\text{ст-кор}} + \vec{R}_{\text{ст-шт}} \right); \quad (5)$$

$$\vec{\varepsilon}_{\text{кор}} = [J_{\text{кор}}]^{-1} \left\{ -\vec{\omega}_{\text{кор}} \times ([J_{\text{кор}}] \vec{\omega}_{\text{кор}}) + \vec{M}_{\text{кор}} \left( \vec{F}_{\text{кор}} \right) + \sum_{k,j} \vec{r}_{\text{кор-ст}} \times \vec{R}_{\text{ст-кор}} \right\}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{\varepsilon}_{\text{ст}} = [J_{\text{ст}}]^{-1} \left\{ -\vec{\omega}_{\text{ст}} \times ([J_{\text{ст}}] \vec{\omega}_{\text{ст}}) + \vec{M}_{\text{ст}} \left( \vec{F}_{\text{ст}} \right) + \vec{r}_{\text{ст-кор}} \times \left( -\vec{R}_{\text{ст-кор}} \right) + \right. \\ \left. + \vec{r}_{\text{ст-шт}} \times \vec{R}_{\text{ст-шт}} + \vec{L}_{\text{ст-шт}} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подстановка этих выражений в равенство (3) дает искомое уравнение связи, линейное относительно неизвестных компонент векторов сил реакции связи  $\vec{R}_{\text{ст-кор}}$ ,  $\vec{R}_{\text{ст-шт}}$  в точке контакта корпуса с  $k, j$ -й стойкой и момента связи  $\vec{L}_{\text{ст-шт}}$ .

Связь между стойкой и штоком допускает относительное проскальзывание вдоль общей продольной оси, а также проворот тел относительно этой оси. Тогда в точке контакта стойки и штока появляется сила реакции (имеющая две проекции на оси, ортогональные продольной) и момент реакции (имеющий две аналогичные проекции). Для определения сил и моментов реакции также необходимо записать уравнения связи. Первое из уравнений связи основано на равенстве радиусов-векторов точки контакта стойки и штока в инерциальной системе координат:

$$\vec{r}_{\text{ст}} + \vec{r}_{\text{ст-шт}} = \vec{r}_{\text{шт}} + \vec{r}_{\text{шт-ст}}.$$

Двойное дифференцирование этого равенства дает

$$\begin{aligned} \vec{a}_{\text{ст}} + \vec{\varepsilon}_{\text{ст}} \times \vec{r}_{\text{ст-шт}} + \vec{\omega}_{\text{ст}} \times (\vec{\omega}_{\text{ст}} \times \vec{r}_{\text{ст-шт}}) + \\ + 2\vec{\omega}_{\text{ст}} \times \frac{d\vec{r}_{\text{ст-шт}}}{dt} + \frac{d^2\vec{r}_{\text{ст-шт}}}{dt^2} = \vec{a}_{\text{шт}} + \vec{\varepsilon}_{\text{шт}} \times \vec{r}_{\text{ст-шт}} + \\ + \vec{\omega}_{\text{шт}} \times (\vec{\omega}_{\text{шт}} \times \vec{r}_{\text{шт-ст}}) \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\frac{d\vec{r}_{\text{ст-шт}}}{dt}$ ,  $\frac{d^2\vec{r}_{\text{ст-шт}}}{dt^2}$  — соответственно локальная относительная скорость и относительное ускорение движения штока внутри стойки.

Ускорение центра масс стойки  $\vec{a}_{ст}$  определяется выражением (5), угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}_{ст}$  — выражением (7).

Для штока аналогичные параметры выражаются следующим образом:

$$\vec{a}_{шт} = m_{шт}^{-1} \left( \vec{F}_{шт} - \vec{R}_{ст-шт} + \vec{R}_{шт-тар} \right); \quad (9)$$

$$\vec{\varepsilon}_{шт} = [J_{шт}]^{-1} \left\{ -\vec{\omega}_{шт} \times ([J_{шт}] \vec{\omega}_{шт}) + \vec{M}_{шт} \left( \vec{F}_{шт} \right) + \vec{r}_{шт-ст} \times \left( -\vec{R}_{ст-шт} \right) + \vec{r}_{шт-тар} \times \vec{R}_{шт-тар} - \vec{L}_{ст-шт} \right\}. \quad (10)$$

Локальная скорость  $\frac{d\vec{r}_{ст-шт}}{dt}$  определяется как

$$\frac{d\vec{r}_{ст-шт}}{dt} = \vec{V}_{шт} - \vec{V}_{ст} + \vec{\omega}_{шт} \times \vec{r}_{шт-ст} - \vec{\omega}_{ст} \times (\vec{r}_{шт} - \vec{r}_{ст} + \vec{r}_{шт-ст}), \quad (11)$$

а радиус-вектор

$$\vec{r}_{ст-шт} = \vec{r}_{шт} - \vec{r}_{ст} + \vec{r}_{шт-ст}. \quad (12)$$

Уравнение для определения реакций связи получается подстановкой (5), (7), (9)–(12) в равенство (8).

Второе уравнение связи между стойкой и штоком отражает равенство проекций угловых скоростей стойки и штока на две оси  $Y, Z$ , ортогональные продольной:

$$\vec{\omega}_{ст} - \vec{\omega}_{шт} = 0.$$

Дифференцирование последнего равенства дает

$$\vec{\varepsilon}_{ст} - \vec{\varepsilon}_{шт} + \vec{\omega}_{ст} \times \vec{\omega}_{шт} = 0. \quad (13)$$

Уравнение для определения реакций связи получается подстановкой (7) и (10) в соотношение (13).

Связь между штоком и тарелью выполнена в виде сферического шарнира. Уравнение (3) для этого типа связи было записано ранее.

Полученная система уравнений связи — линейная относительно неизвестных компонент реакций связей  $\vec{R}_{ст-кор}$ ,  $\vec{R}_{ст-шт}$ ,  $\vec{R}_{шт-тар}$ ,  $\vec{L}_{ст-шт}$ . Эти векторы могут быть спроектированы на оси какой-либо системы координат (иногда для этого вводятся специальные системы координат связей). Размер матрицы коэффициентов при неизвестных компонентах реакций связи равен  $10 \times j \times k$ .

Коэффициенты при неизвестных этой системы переменны по времени, так как зависят в том числе и от кинематических параметров тел в каждый конкретный момент времени (угловых скоростей тел, линейных скоростей и радиусов-векторов характерных точек и др.).

**Пример реализации.** Рассмотрен процесс выбора энергетических характеристик амортизатора для случая штатной посадки ВКА на

подготовленную грунтовую посадочную поверхность без локальных бугров и впадин как естественного, так и искусственного происхождения. Предполагалось, что приемлемость любого варианта расчета обеспечивается, если продольная перегрузка не превышает некоторого предельного значения, в данном случае равного 8 единицам, а также если в течение всего процесса движения аппарата по посадочной поверхности обеспечивается определенный минимальный клиренс, равный 150 мм. Обязательным также является устойчивость движения (отсутствие опрокидывания или кувырков).

Грунт интерпретировался реологической моделью Фойгта для тарели сферической формы диаметром  $d_T = 0,6$  м. В расчете использовались две разновидности грунта: с низкой жесткостью  $C_T = 0,8 \times 10^6$  кгс/м<sup>3</sup>, что соответствует слабым супесчаным почвам, и с высокой жесткостью  $C_T = 55 \cdot 10^6$  кгс/м<sup>3</sup>, что близко к мерзлым тяжелым грунтам.

К моменту касания грунта в случае штатной посадки система управления аппарата обеспечит следующие параметры движения, являющиеся начальными условиями для расчета посадки:

- вертикальная скорость снижения  $v_v = 1,5 \pm 1,5$  м/с;
- горизонтальная скорость  $v_r = 1,5 \pm 1,5$  м/с;
- угловая скорость относительно любой из осей аппарата  $\omega = 0 \pm 5$  °/с;
- угловое отклонение продольной оси аппарата от вертикали  $\theta = 0^\circ \pm 5^\circ$ .

Для нештатных случаев посадки возможно превышение указанных выше скоростей и углов подхода. Кроме того, возможен учет силы тяги последствия тормозного двигателя (в случае необходимости его использования).

Целью практического анализа является подбор таких энергетических характеристик амортизаторов, при которых выполняются не только указанные ограничения по продольной перегрузке, клиренсу и устойчивости, но и конструктивные ограничения по располагаемому ходу амортизаторов.

При определении максимальной перегрузки игнорировались отдельные пиковые выбросы длительностью менее 30 мс [15].

Проведенные расчеты показали, что при соответствующем выборе профиля энергетической характеристики амортизатора (рис. 4) приведенные ограничения могут быть выполнены. Характеристика представляет собой зависимость силы  $F$ , кН, от хода штока  $H$ , мм, амортизатора, имеет линейный участок начального обжатия и две ступени пороговой силы 70 кН и 250 кН, кроме того, до момента касания с посадочной поверхностью, амортизатор имеет некоторую начальную силу, часто её называют начальным обжатием (на графике значение



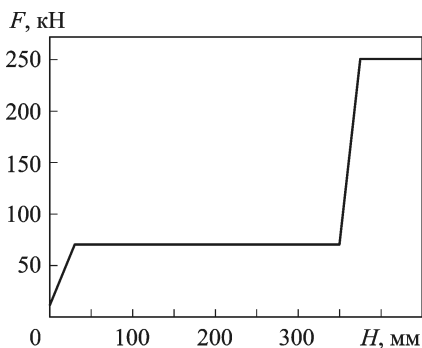
$F$  при  $H = 0$  м). Градиент выхода на первую пороговую силу и значение этой силы (70 кН) подобраны таким образом, чтобы в случае штатной посадки выполнялось ключевое ограничение по значению максимально допустимой вертикальной перегрузке.

Для нештатных случаев, где имеют место более высокие скорости и большие углы подхода к поверхности, после отработки первой ступени амортизатор переходит на вторую

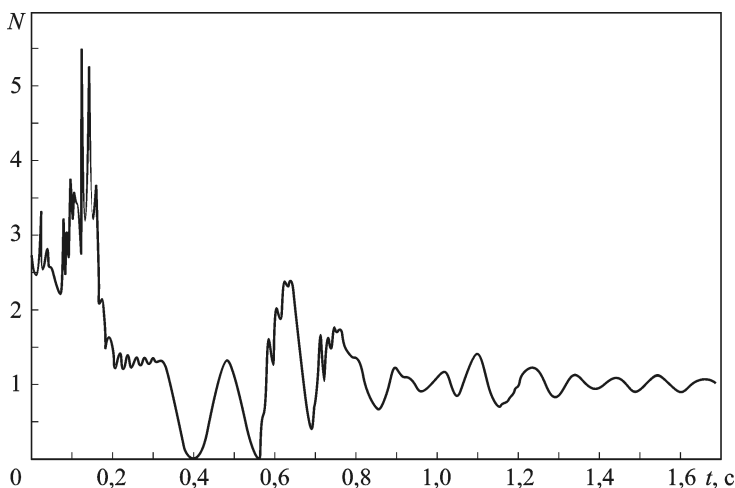
(250 кН), но только в том случае, если нагрузка на шток амортизатора превысит значение первой пороговой силы. Таким образом, наличие второй ступени позволяет погасить более высокую кинетическую энергию, характерную для нештатных случаев посадки. Важно отметить, что данная энергетическая характеристика амортизатора актуальна для конкретной конфигурации космического аппарата и геометрии посадочного устройства.

Перегрузка (рис. 5) при рассматриваемых начальных параметрах не превышает допустимых границ, что является требованием, предъявляемым к процессу посадки ВКА. В момент первого контакта с посадочной поверхностью перегрузка имеет максимальное значение — первый выброс, затем затухающие колебания как следствие работы посадочного устройства.

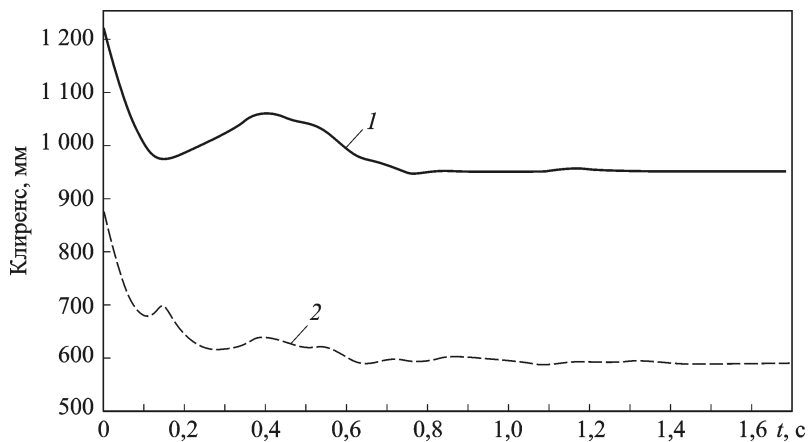
На рис. 6 показан клиренс для рамы, которая является элементом посадочного устройства, и для днища корпуса. Необходимо отметить, что условие по клиренсу выполняется, причем с достаточным запасом.



**Рис. 4. Энергетическая характеристика амортизатора опоры ВКА**

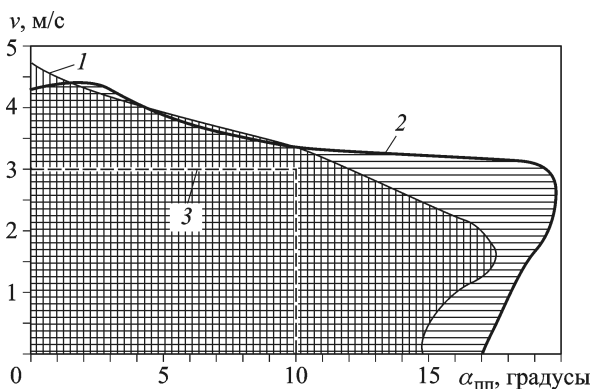


**Рис. 5. Перегрузка ВКА**



**Рис. 6. Клиренс ВКА:**

1 — днище, 2 — рама



**Рис. 7. Области устойчивой посадки ВКА:**

1 — горизонтальная скорость ВКА; 2 — вертикальная скорость ВКА, 3 — область штатных условий посадки

Получены области устойчивости (рис. 7) в параметрах предельно допустимых уклонов посадочной поверхности и сочетаний линейных и угловых скоростей, при которых исключается опрокидывание. Из графиков видно, что в диапазоне начальных скоростей, обеспечиваемых возможностями системы управления аппарата, процесс посадки происходит устойчиво.

**Выводы.** Разработана математическая модель процесса посадки ВКА, которая позволяет проводить оптимизационные расчеты процесса посадки и выбор характеристик посадочного устройства, анализировать основные результирующие процессы посадки такие, как перегрузка, клиренс, устойчивость. Рассмотрен случай штатной посадки на примере модели ВКА с определенными инерционно-массовыми характеристиками. В результате большого числа оптимизационных расчетов был предложен профиль энергетической характеристики амортизаторов опор посадочного устройства, отвечающий требованиям к

процессу посадки и дальнейшему функционирования ВКА, получена область устойчивой посадки в зависимости от вектора состояния на момент первого контакта с посадочной поверхностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Легостаев В. П., Миненко В. Е. Возвращаемая баллистическая капсула “Радуга” научно-производственного объединения “Энергия”. – М.: Центр научно-технической информации “Поиск”, 1994. – 64 с.
2. Бакулин В. Н., Анфалов А. С., Борзых С. В., Решетников М. Н. Моделирование динамики отделения возвращаемой капсулы от грузового транспортного корабля // Междунар. конф. “6 Окуневские чтения”. – СПб.: Изд-во БГТУ, 2008. – Т. 2. – С. 124–129.
3. Базилевский А. Т., Григорьев Е. И., Ермаков С. Н. Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
4. Баженов В. И., Осин М. С. Посадка космических аппаратов на планеты. – М.: Машиностроение, 1978. – 159 с.
5. Пичхадзе К. М., Воронцов В. А., Заширинский А. М., Пономарев П. А. Системы спуска с орбиты и аварийного спасения на основе надувного тормозного устройства // Полет. – 2003. – № 8. – С. 9–13.
6. Борзых С. В., Родионов О. Л., Марков М. В. Компьютерное моделирование процесса мягкой посадки спускаемого аппарата, выполненного по схеме “несущий корпус” // Тез. докл. конф. “Научно-технические проблемы Московского мегаполиса”. – М.: ИМАШ им. Благодирова РАН, 2002. – С. 80–81.
7. Бакулин В. Н., Борзых С. В., Родионов О. Л., Марков М. В. Моделирование процесса мягкой посадки спускаемого аппарата, выполненного по схеме “несущий корпус” // 3 Междунар. конф. и выставка “Авиация и космонавтика”. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – С. 71–72.
8. Буслеев С. П., Стулов В. А., Григорьев Е. И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование посадки межпланетных станций “Венера 9–14” на деформируемые грунты // Космические исследования. – 1983. Вып. 3. – С. 540–544.
9. Буслеев С. П. Прогнозирование успешной посадки автоматической межпланетной станции на поверхность небесного тела в условиях неопределенности // Космические исследования. – 1987. – Вып. 2. – С. 186–192.
10. Буслеев С. П. Имитационные и интерактивные процедуры в задаче поиска параметров посадочных устройств АМС типа “Вега-1, 2” // Космические исследования. – 1988. – Вып. 1. – С. 41–48.
11. Арутюнян А. Г. Силовые нагрузки на космических аппаратах при посадке в условиях марсианской пылевой бури // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т. 42. № 2. – С. 321–325.
12. Микишев Т. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
13. Бакулин В. Н., Борзых С. В., Воронин В. В. Математическое моделирование процесса посадки космического аппарата на участке его контакта с поверхностью // Вестник МАИ. – 2011. – Т. 18. – № 5. – С. 211–218.
14. Мак-Фарланд Р. К. Гексагональные сотовые конструкции под действием критической осевой нагрузки // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – № 6. – С. 125–131.
15. Рабинович Б. А. Безопасность человека при ускорениях. – М.: “Книга и бизнес”, 2007. – 208 с.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012