

УДК 629.78

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ПОСАДКИ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА НА УЧАСТКЕ ЕГО КОНТАКТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2012 В. В. Воронин

ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королёва

Рассматривается модель динамики движения космического аппарата по посадочной поверхности с момента его первого контакта. Корпус аппарата и элементы его посадочного устройства рассматриваются как структурно сложная механическая система с внутренними связями. Получен алгоритм определения реакций этих связей. Выявлены ключевые параметры, влияющие на динамику процесса, исследована безопасность посадки в рамках конкретных ограничений.

Космический аппарат, динамика посадки, механические связи, посадочная поверхность, перегрузка, устойчивость движения.

Введение

Процесс мягкой посадки спускаемого аппарата (СА) на поверхность планеты – одна из ключевых операций, непосредственно влияющих на выполнение общей программы полета. В данной статье рассматривается динамика СА, начиная от момента первого контакта с грунтом посадочной поверхности до полной остановки аппарата. Это конечное положение должно обеспечить дальнейшее функционирование аппарата (развёртывание научной аппаратуры для проведения исследований, спуск автоматического планетохода, выход экипажа в случае пилотируемой миссии).

Особенностью данного этапа процесса посадки является необходимость гашения большой кинетической энергии, которой обладает СА в момент первого контакта с поверхностью. Большая часть энергии аппарата предварительно гасится на участке спуска. Для планет с атмосферой гашение энергии происходит за счёт сил лобового сопротивления (баллистические траектории), использования парашютных систем, надувных тормозных устройств [1-3, 11]. На планетах без атмосферы для предварительного гашения скорости перед контактом с поверхностью используются тормозные двигатели [2,3].

Постановка задачи

К моменту контакта с поверхностью СА обладает некоторыми остаточными линейными и угловыми скоростями, которые и гасятся в процессе движения и взаимодействия СА с поверхностью до полной остановки. Важно подчеркнуть, что в силу ряда обстоятельств (погрешностей системы управления спуском, порывов ветра, неточного знания ряда характеристик самого СА) кинематические параметры СА лежат в некотором диапазоне. Кроме того, ориентация посадочной поверхности и её физико-механические свойства могут быть случайными (а иногда непредсказуемыми) [7,8].

В то же время при осуществлении посадки необходимо выполнить ряд требований: «мягкость» посадки (ограничения, например, по перегрузкам), сохранение устойчивости в течение движения СА по посадочной поверхности, достижение такой ориентации СА в момент остановки, при которой обеспечивается возможность дальнейшего функционирования.

Безусловно, процесс мягкой посадки отрабатывается на наземных экспериментальных установках, как правило, маятникового типа, позволяющих моделировать в реальных диапазонах сочетание вертикальной и горизонтальной компонент скорости. Предусматривается возмож-

ность смены грунтов на специально подготовливаемой площадке, задание разного наклона посадочной плоскости и некоторые другие возможности [2-4].

Тем не менее возможности наземной экспериментальной отработки ограничены, поскольку на установках не удаётся в полной мере воспроизвести реальные условия посадки (например, отличные от земной гравитацию) и всё многообразие сочетаний начальных условий в момент контакта с поверхностью. Далее эксперименты, как правило, проводятся на масштабных моделях и результаты пересчитываются с помощью теории подобия. Сам же выбор характеристик посадочных устройств (ПУ) – это громоздкая оптимизационная задача, требующая рассмотрения случаев посадки во всём диапазоне разброса кинематических параметров СА (линейных и угловых скоростей), углов подхода, свойств грунта [7,8], сравнения возможных различных типов ПУ.

Такого рода анализ, особенно если он проводится на начальных стадиях разработки аппарата, может быть осуществлён только путём математического моделирования, с проведением большого объёма оптимизационных расчётов.

Назначение собственно посадочного устройства – осуществлять гашение остаточной кинетической энергии, которой обладает СА в момент контакта с поверхностью в условиях ограничений, описанных выше. Из всего многообразия возможных ПУ [2,3,6] в данной статье рассмотрим, пожалуй, наиболее часто используемые ПУ рычажного типа с демпфером.

Динамическая модель системы

Движение СА с рычажными ПУ моделируются механической системой тел, состоящей из центрального тела (корпуса СА) и амортизаторов, один конец которых крепится к корпусу СА, а другой – к тарели, непосредственно контактирующей с посадочной поверхностью (рис. 1). Число

тарелей обычно выбирается 3 или 4 (обозначим число тарелей индексом « k »). К каждой тарели сходятся от корпуса три амортизатора (число амортизаторов, подходящих к « k »-й тарели, обозначим « j »); иногда один или два амортизатора в «треноге» могут быть заменены жёсткими стержнями.

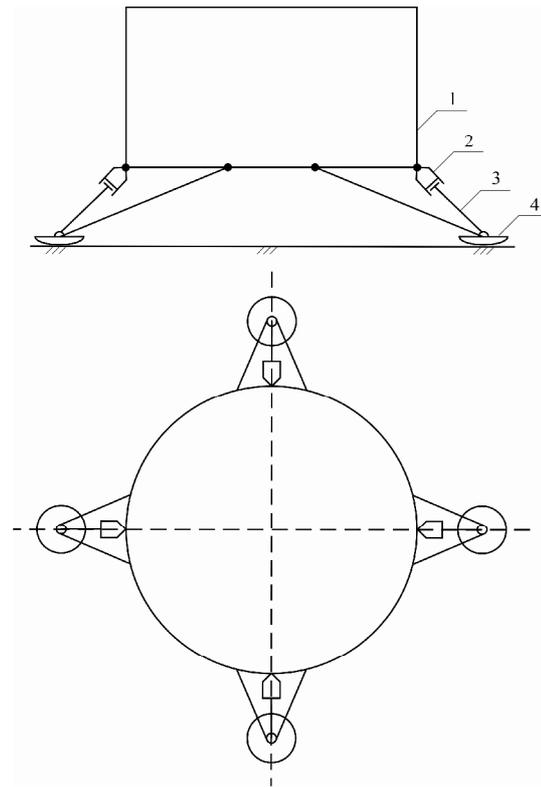


Рис. 1. Схема СА с ПУ: 1 – корпус СА, 2 – стакан, 3 – шток, 4 – тарель

Каждый « j »-й амортизатор « k »-й тарели считается состоящим из штока и стакана; внутри последнего находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты).

Существующие подходы к проблеме предполагают либо использование плоских моделей, которые могут быть применены лишь для предварительных, качественных оценок [2], либо использование пространственных моделей, в которых движение корпуса и опор рассматривается независимо, масса стержней, штоков и стаканов не учитывается, а тарели приписывается некоторая «приведённая» масса [3]. Для такого подхода есть определён-

ные основания. Действительно, масса штока и стакана существенно меньше массы корпуса СА и даже массы тарели. Однако неучёт их массы автоматически означает внесение методической погрешности в динамическую модель. Кроме того, существенной проблемой становится выбор «приведённой» массы тарели. Критерием приведения может быть только сравнение с экспериментом, который всегда носит совершенно конкретный характер (масштаб модели, тип грунта, угол наклона поверхности). В силу этого критерий выбора «приведённой» массы будет корректен лишь в каком-либо диапазоне расчётных условий и, в любом случае, никогда не будет универсальным.

Для разработки модели вводятся правые системы координат: инерциальная и связанные с центрами масс тел системы. Для каждого i -го тела (корпуса СА, « k »-й тарели, « k,j »-го стакана и штока) записываются уравнения движения центров масс (в инерциальной системе координат) и вращения относительно центров масс (в связанных системах координат):

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_i, \tag{1}$$

$$[J_i] \mathbf{\dot{\epsilon}}_i + \mathbf{\dot{w}}_i \times ([J_i] \mathbf{w}_i) = \mathbf{L}_{oi}, \tag{2}$$

где $\mathbf{F}_i, \mathbf{L}_{oi}$ – соответственно главные вектора сил и моментов сил относительно центров масс, включая силы и моменты реакций связей; $m_i, [J_i]$ – соответственно масса и тензор инерции i -го тела относительно его центральных осей; $\mathbf{\epsilon}_i, \mathbf{\omega}_i$ – соответственно угловое ускорение и угловая скорость тел.

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

Уравнения связей

Уравнения движения (1), (2) не могут быть непосредственно проинтегрированы, поскольку, кроме вышеперечислен-

ных силовых факторов, в них входят неизвестные силы и моменты реакций связи. Для определения реакций связи в точках контакта корпус СА – « k,j » – стакан, « k,j » – стакан – « k,j » – шток, « k,j » – шток – « k » – тарель – записываются дополнительные уравнения связи.

Корпус и « k,j »-й стакан соединены связью в виде сферического шарнира, запрессающего в точке связи линейные относительные перемещения. В соответствии с предложенным в данной статье подходом движение каждого тела рассматривается отдельно. Тогда действие « k,j »-го – стакана на корпус учитывается в виде пространственной реакции (трёх её неизвестных проекций на какие-либо координатные оси). На стакан со стороны корпуса действует сила, равная по модулю и противоположная по направлению. Уравнение для определения этой силы реакции связи основано на условии нерасхождения шарнирной точки контакта корпуса и « k,j »-го – стакана (далее индекс « k,j » опускается, рис. 2,3):

$$\mathbf{r}_{кор} + \mathbf{r}_{кор-ст} = \mathbf{r}_{ст} + \mathbf{r}_{ст-кор},$$

где $\mathbf{r}_{кор}, \mathbf{r}_{ст}$ – радиусы-векторы, определяющие положение центров масс корпуса и стакана в инерциальной системе координат, $\mathbf{r}_{кор-ст}, \mathbf{r}_{ст-кор}$ – радиусы-векторы, определяющие положение точки контакта в связанных системах координат каждого из тел.

Векторное равенство можно дважды продифференцировать, т.к. при общей точке контакта её полная скорость и ускорение в инерциальной системе координат одинаковы для корпуса и стакана в произвольный момент времени:

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}_{кор} + \mathbf{\epsilon}_{кор} \times \mathbf{r}_{кор-ст} + \\ & + \mathbf{\omega}_{кор} \times \left(\mathbf{\omega}_{кор} \times \mathbf{r}_{кор-ст} \right) = \mathbf{a}_{ст} + \\ & + \mathbf{\epsilon}_{ст} \times \mathbf{r}_{ст-кор} + \\ & + \mathbf{\omega}_{ст} \times \left(\mathbf{\omega}_{ст} \times \mathbf{r}_{ст-кор} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

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

$$\mathbf{a}_{кор} = m_{кор}^{-1} (\mathbf{F}_{кор} + \mathbf{R}_{см-кор}), \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_{см} = m_{см}^{-1} (\mathbf{F}_{см} - \mathbf{R}_{см-кор} + \mathbf{R}_{см-шт}), \quad (5)$$

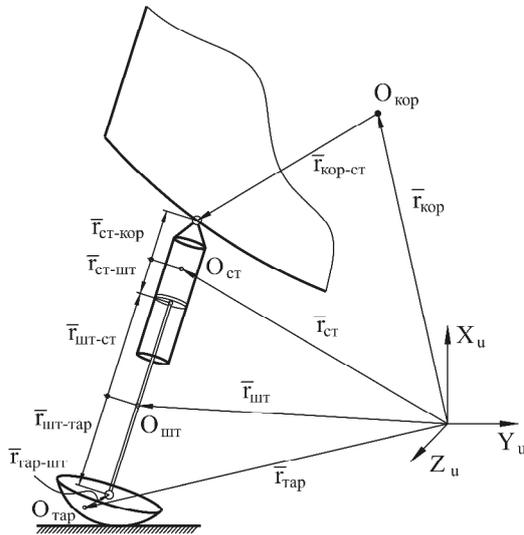


Рис. 2. Расчётная схема

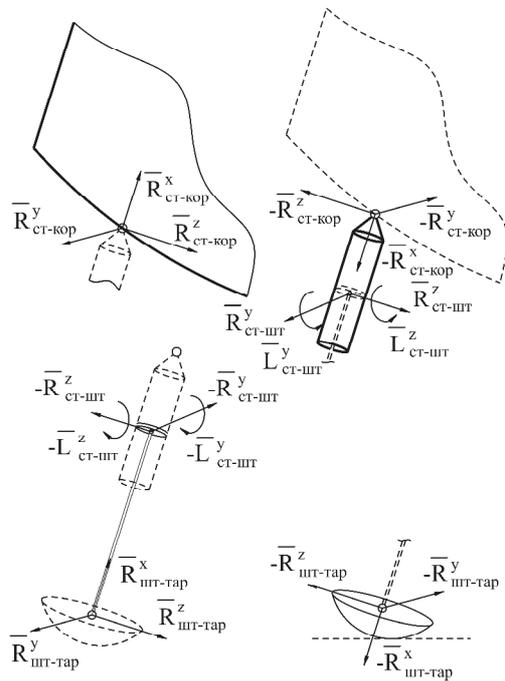


Рис. 3. Структура векторов реакций связей

$$\mathbf{\varepsilon}_{кор} = \left[\mathbf{J}_{кор} \right]^{-1} \left\{ -\mathbf{\omega}_{кор} \times \left(\left[\mathbf{J}_{кор} \right] \mathbf{\omega}_{кор} \right) + \mathbf{M}_{кор}(\mathbf{F}_{кор}) + \sum_{k,j} \left(\mathbf{r}_{кор-см} \times \mathbf{R}_{см-кор} \right) \right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{\varepsilon}_{ст} = \left[\mathbf{J}_{ст} \right]^{-1} \left\{ -\mathbf{\omega}_{ст} \times \left(\left[\mathbf{J}_{ст} \right] \mathbf{\omega}_{ст} \right) + \mathbf{M}_{ст}(\mathbf{F}_{ст}) + \mathbf{r}_{ст-кор} \times \left(-\mathbf{R}_{ст-кор} \right) + \mathbf{r}_{ст-шт} \times \mathbf{R}_{ст-шт} + \mathbf{L}_{ст-шт} \right\} \quad (7)$$

Подстановка этих выражений в равенство (3) даёт искомое уравнение связи, линейное относительно неизвестных компонент векторов сил реакции связи $\mathbf{R}_{см-кор}$, $\mathbf{R}_{см-шт}$ в точке контакта корпуса с «k,j»-м стаканом и момента связи $\mathbf{L}_{ст-шт}$.

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

$$\mathbf{r}_{см} + \mathbf{r}_{см-шт} = \mathbf{r}_{шт} + \mathbf{r}_{шт-см}.$$

Двойное дифференцирование этого равенства даёт:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{см} + \mathbf{\varepsilon}_{см} \times \mathbf{r}_{см-шт} + \mathbf{\omega}_{см} \times \left(\mathbf{\omega}_{см} \times \mathbf{r}_{см-шт} \right) + 2\mathbf{\omega}_{см} \times \frac{\tilde{d}\mathbf{r}_{см-шт}}{dt} + \frac{\tilde{d}^2\mathbf{r}_{см-шт}}{dt^2} = \mathbf{a}_{шт} + \mathbf{\varepsilon}_{шт} \times \mathbf{r}_{шт-см} + \mathbf{\omega}_{шт} \times \left(\mathbf{\omega}_{шт} \times \mathbf{r}_{шт-см} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

где $\frac{\tilde{d}\mathbf{r}_{см-шт}}{dt}$, $\frac{\tilde{d}^2\mathbf{r}_{см-шт}}{dt^2}$ – соответственно локальная относительная скорость и относительное ускорение движения штока внутри стакана.

Ускорение центра масс стакана $\overset{\mathbf{r}}{a}_{cm}$ определяется выражением (5), угловое ускорение $\overset{\mathbf{r}}{\varepsilon}_{cm}$ - выражением (7). Для штока аналогичные параметры определяются следующим образом:

$$\overset{\mathbf{r}}{a}_{um} = m_{um}^{-1} (\overset{\mathbf{r}}{F}_{um} - \overset{\mathbf{r}}{R}_{cm-um} + \overset{\mathbf{r}}{R}_{um-tap}), \quad (9)$$

$$\overset{\mathbf{r}}{\varepsilon}_{um} = [J_{um}]^{-1} \left\{ -\overset{\mathbf{r}}{\omega}_{um} \times \left([J_{um}] \overset{\mathbf{r}}{\omega}_{um} \right) + M_{um} \overset{\mathbf{r}}{F}_{um} + \overset{\mathbf{r}}{r}_{um-cm} \times \left(-\overset{\mathbf{r}}{R}_{cm-um} \right) + \overset{\mathbf{r}}{r}_{um-tap} \times \overset{\mathbf{r}}{R}_{um-tap} - \overset{\mathbf{r}}{L}_{cm-um} \right\}. \quad (10)$$

Локальная скорость $\frac{d\overset{\mathbf{r}}{r}_{cm-um}}{dt}$ определяется как

$$\frac{d\overset{\mathbf{r}}{r}_{cm-um}}{dt} = \overset{\mathbf{r}}{V}_{um} - \overset{\mathbf{r}}{V}_{cm} + \overset{\mathbf{r}}{W}_{um} \times \overset{\mathbf{r}}{r}_{um-cm} - \overset{\mathbf{r}}{W}_{cm} \times (\overset{\mathbf{r}}{r}_{um} - \overset{\mathbf{r}}{r}_{cm} + \overset{\mathbf{r}}{r}_{um-cm}), \quad (11)$$

а радиус-вектор

$$\overset{\mathbf{r}}{r}_{cm-um} = (\overset{\mathbf{r}}{r}_{um} - \overset{\mathbf{r}}{r}_{cm} + \overset{\mathbf{r}}{r}_{um-cm}). \quad (12)$$

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

Второе уравнение связи между стаканом и штоком отражает равенство угловых скоростей стакана и штока на две оси, ортогональные продольной:

$$\overset{\mathbf{r}}{\omega}_{cm} = \overset{\mathbf{r}}{\omega}_{um} \text{ или } \overset{\mathbf{r}}{\omega}_{cm} - \overset{\mathbf{r}}{\omega}_{um} = 0.$$

Дифференцирование последнего равенства даёт:

$$\overset{\mathbf{r}}{\varepsilon}_{cm} - \overset{\mathbf{r}}{\varepsilon}_{um} + \overset{\mathbf{r}}{W}_{cm} \times \overset{\mathbf{r}}{\omega}_{um} = 0. \quad (13)$$

Уравнения для определения реакций связи получаются подстановкой (7) и (10) в (13).

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

Полученная система уравнений связи линейна относительно неизвестных

компонент реакций связей: $\overset{\mathbf{r}}{R}_{cm-кор}$, $\overset{\mathbf{r}}{R}_{cm-um}$, $\overset{\mathbf{r}}{R}_{um-tap}$, $\overset{\mathbf{r}}{L}_{cm-um}$. Эти вектора могут быть спроектированы из оси какой-либо системы координат. Размерность матрицы коэффициентов при неизвестных компонентах реакций связи равна 10×10 . Коэффициенты при неизвестных этой системы переменны по времени, так как зависят от кинематических параметров тел в каждый конкретный момент времени.

Анализ результатов

Рассмотрен процесс посадки СА на подготовленную грунтовую посадочную поверхность без локальных бугров и впадин как естественного, так и искусственного происхождения. Предполагалось, что приемлемость любого варианта расчёта обеспечивается при непревышении продольной перегрузкой некоторого предельного значения, а также обеспечением в течение всего процесса движения СА по посадочной поверхности определенного минимального клиренса. Обязательным также является устойчивость движения (отсутствие опрокидывания или кувырков).

Грунт интерпретировался реологической моделью Фойгта для тарели сферической формы с диаметром $d_m = 0,6$ м. В расчёте использовались две разновидности грунта: с низкой жёсткостью $C_2 = 0,8 \cdot 10^6$ кгс/м³, что соответствует слабым супесчаным почвам, и с высокой жёсткостью $C_2 = 55 \cdot 10^6$ кгс/м³, что близко к мёрзлым тяжёлым грунтам.

К моменту касания грунта система управления СА обеспечит следующие параметры движения, являющиеся начальными условиями для расчёта посадки:

- вертикальная скорость $V_6 = (1,5 \pm 1,5)$ м/с;
- горизонтальная скорость $V_2 = (1,5 \pm 1,5)$ м/с;
- угловая скорость относительно любой из осей ВА $w = (0 \pm 5)$ °/с;

- угловое отклонение продольной оси ВА от вертикали $q = (0 \pm 5)^\circ$.

Кроме того, возможен учёт 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 выше ограничения по продольной перегрузке, клиренсу и устойчивости, но и конструктивные ограничения по располагаемому ходу амортизаторов.

При определении максимальной перегрузки игнорировались отдельные пи-

ковые выбросы длительностью менее 30 мс [9].

Перегрузка (рис. 4) при рассматриваемых начальных параметрах не превышает допустимых границ, что является требованием к ПУ. В начальный момент касания перегрузка имеет максимальное значение – первый выброс, затем затухающие колебания как следствие работы ПУ.

Получены области устойчивости (рис. 5) в параметрах предельно допустимых уклонов посадочной поверхности и сочетаний линейных и угловых скоростей, при которых обеспечивается неопрокидывание.

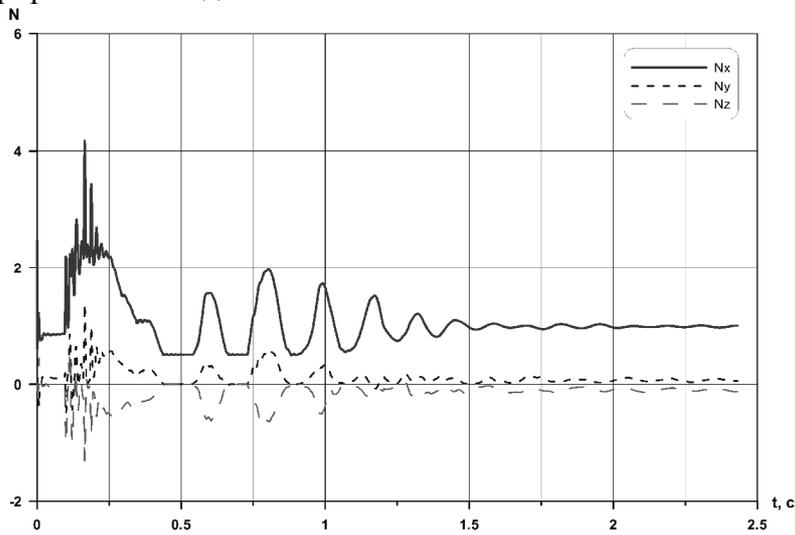


Рис. 4. Перегрузка СА

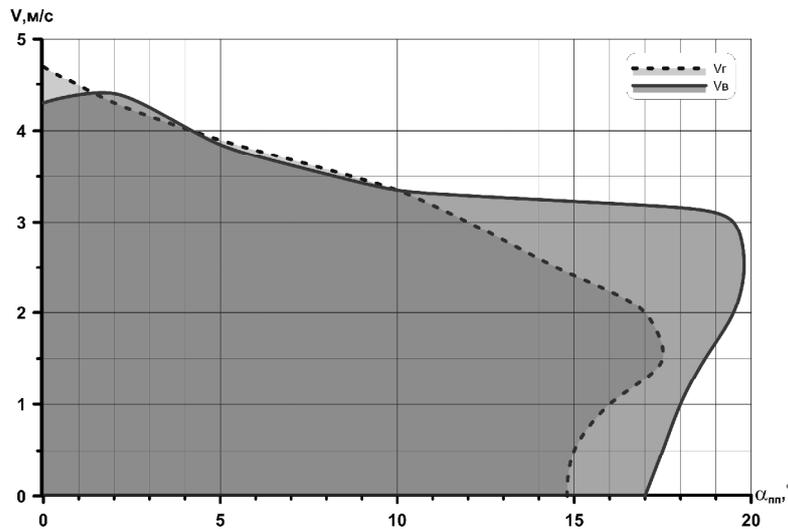


Рис. 5. Области устойчивой посадки СА

Библиографический список

1. Легостаев, В. П. Возвращаемая баллистическая капсула «Радуга» научно-производственного объединения «Энергия» [Текст] / В. П. Легостаев, В. Е. Миненко / Центр научно-технической информации.- М.: Поиск, 1994. – С. 64.

2. Базилевский, А. Т. Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов [Текст] / А. Т. Базилевский, Е. И. Григорьев, С. Н. Ермаков. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 264.

3. Баженов, В. И. Посадка космических аппаратов на планеты [Текст] / В. И. Баженов, М. С. Осин. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 159.

4. Микишев, Т. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов [Текст] / Т. Н. Микишев. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 248.

5. Системы спуска с орбиты и аварийного спасения на основе надувного тормозного устройства [Текст] / К. М. Пичхадзе, В. А. Воронцов, А. М. Защиринский [и др.] / Полет. – 2003. – № 8. – С. 9-13.

6. Борзых, С. В. Компьютерное моделирование процесса мягкой посадки спускаемого аппарата, выполненного по схеме «несущий корпус» [Текст] / С. В. Борзых, О. Л. Родионов, М. В. Марков // Тез. докладов конференции «Научно-технические проблемы Московского мегаполиса». – М.: ИМАШ им. Благоднарова РАН, 2002. – С. 80-81.

7. Буслаев, С. П. Математическое моделирование и экспериментальное исследование посадки межпланетных станций «Венера 9-14» на деформируемые грунты [Текст] / С. П. Буслаев, В. А. Стулов, Е. И. Григорьев // Космические исследования. - 1983. – Вып.3. – С. 540-544.

8. Буслаев, С. П. Прогнозирование успешной посадки автоматической межпланетной станции на поверхность небесного тела в условиях неопределённости [Текст] / С. П. Буслаев // Космические исследования. - 1987. – Вып.2. – С. 186-192.

9. Рабинович, Б. А. Безопасность человека при ускорениях [Текст] / Б. А. Рабинович. – М.: Книга и бизнес, 2007. – С. 208.

**DYNAMICS OF SPACECRAFT LANDING
IN THE AREA OF ITS CONTACT WITH THE SURFACE**

© 2012 V. V. Voronin

Rocket Space Corporation “Energiya” plc named after S. P. Korolyov

The paper presents a mathematical model of the dynamics of spacecraft motion on the surface since the moment of their contact. The spacecraft body and the elements of the spacecraft’s landing structure are regarded as a mechanical system of complex structure with internal connections. The algorithm of determining the reactions of these connections is obtained. The key parameters that affect the dynamics of the process are revealed, the safety of landing within the limits of concrete restrictions is analyzed.

Spacecraft, dynamics of landing, mechanical connections, landing surface, overload, stability of motion.

Информация об авторе

Воронин Виталий Викторович, инженер открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева». E-mail: vitaliyvoronin@gmail.com. Область научных интересов: моделирование динамики космических систем.

Voronin Vitaliy Victorovich, engineer, Rocket Space Corporation “Energiya” plc. E-mail: vitaliyvoronin@gmail.com. Area of research: simulation of the dynamics of space systems.