

УДК 629.78

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОПОР ПОСАДОЧНОГО УСТРОЙСТВА ВОЗВРАЩАЕМОГО АППАРАТА

© 2013 С. В. Борзых, В. В. Воронин, Ю. Н. Щиблев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва,  
г. Королёв, Московская обл.

Рассматривается математическая модель динамики процесса посадки возвращаемого аппарата на посадочную поверхность с целью исследования устойчивости движения и работоспособности посадочного устройства. Механическая система, включающая корпус аппарата и элементы посадочного устройства, представляет собой структуру абсолютно жёстких тел с внутренними связями. Проведён сравнительный анализ процесса посадки на предмет оптимального выбора конфигурации посадочного устройства.

*Возвращаемый аппарат, посадочное устройство, динамика посадки, устойчивость движения, работоспособность, посадочная поверхность, клиренс.*

### Введение

Спуск и посадка являются ключевыми этапами космического полёта, так как только успешное их выполнение позволит решить поставленные задачи. Особенностью непосредственно процесса посадки является необходимость гашения остаточной кинетической энергии, которой обладает аппарат в момент первого контакта с поверхностью. Большая часть энергии гасится на участке спуска. Для планет с атмосферой гашение энергии происходит за счёт силы лобового сопротивления, использования парашютных систем и т.д. На планетах без атмосферы для предварительного гашения скорости перед контактом с поверхностью используются тормозные двигатели [1–3].

Для многоразовых космических аппаратов, касаясь непосредственно возвращаемого на поверхность планеты аппарата, характерным является наличие посадочного устройства (ПУ). Тип ПУ возвращаемого аппарата (ВА) зависит от заранее определённого характера посадки и субстанции, с которой предстоит ему контактировать. Посадочные устройства влияют на облик ВА и могут служить признаком отличия аппаратов друг от друга. Различают средства для предпосадочного торможения и средства для амор-

тизации при мягкой посадке. Из наиболее распространённых типов ПУ можно выделить упругие надувные баллоны, двигатели мягкой посадки, обеспечивающие вертикальный импульс в момент контакта с поверхностью и стержневые системы с различными поглотителями энергии [3]. Последний тип ПУ и будет предметом рассмотрения данной работы.

Рассмотрение процесса посадки ВА, начиная с момента первого контакта посадочной поверхности до полной остановки аппарата, осуществляется с целью анализа устойчивости процесса посадки и работоспособности двух вариаций ПУ для ВА.

### Постановка задачи

К моменту контакта с поверхностью ВА обладает некоторыми линейными и угловыми скоростями, которые гасятся в процессе движения ВА и взаимодействия его ПУ с посадочной поверхностью до полной остановки ВА. Необходимо отметить, что в силу ряда обстоятельств (погрешностей системы управления спуском, порывов ветра, неточного знания ряда характеристик самого ВА и др.) кинематические параметры ВА и характеристики посадочной поверхности лежат в некотором диапазоне [4, 5].

Таким образом, рассматривая посадку многоразового аппарата, необходимо выполнить ряд требований для обеспечения многоразовости: «мягкость» посадки (ограничения по нагрузкам на конструкцию ВА), сохранение устойчивости в течение движения ВА по посадочной поверхности (отсутствие опрокидывания), выдерживание минимально допустимого клиренса (зазора) между корпусом ВА и посадочной поверхностью.

Как правило, процесс посадки отрабатывается на наземных экспериментальных установках [6]. Однако возможности эксперимента ограничены, поскольку не удаётся в полной мере воспроизвести реальные условия посадки (например, отличную от земной гравитацию) и всё многообразие сочетаний начальных условий в момент контакта с поверхностью. Эксперименты, как правило, проводятся на масштабных моделях, и результаты пересчитываются с помощью теории подобия. Сам же выбор характеристик ПУ – это громоздкая оптимизационная задача, требующая рассмотрения случаев посадки во всем диапазоне разброса кинематических параметров ВА (линейных и угловых ско-

ростей), углов подхода, свойств грунта [4, 5], сравнения возможных конфигураций ПУ.

Подобного рода анализ обычно проводят до воплощения аппарата и его ПУ в «железо». Таким образом, возникает необходимость реализации математической модели процесса посадки. Следует отметить, что данное исследование основано на ряде работ [7–9], целью которых было рассмотрение конкретной схемы ПУ и выбор его оптимальных характеристик для удовлетворения требованиям к процессу посадки.

Рассматривая две схемы ПУ стержневого типа [7], необходимо проанализировать процесс посадки для широкого спектра начальных условий. Для оценки работы той или иной схемы был проведён анализ устойчивости и работоспособности каждой схемы ПУ в определённой области начальных условий.

### Схемы посадочных устройств

ПУ включает в себя четыре одинаковые по конструкции посадочные опоры (рис. 1).

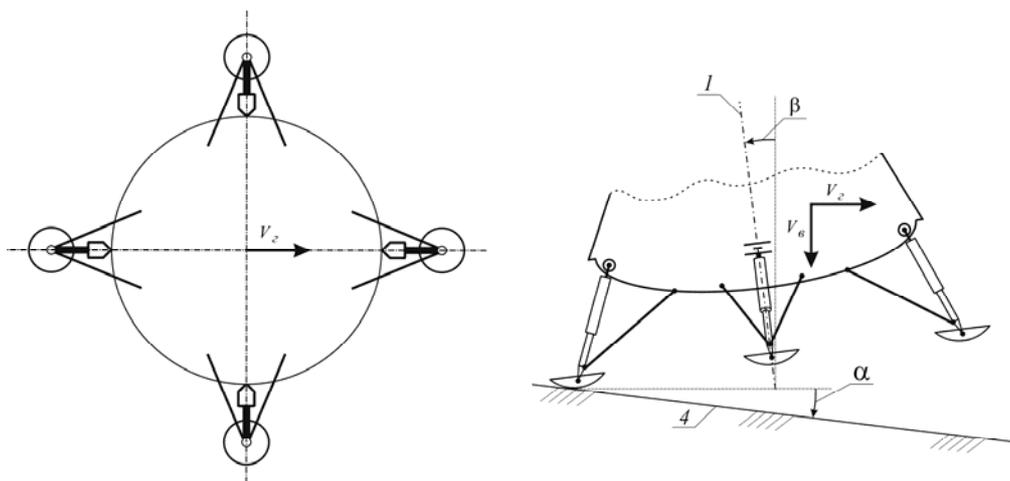


Рис. 1. Общая схема ПУ на ВА: 1 – посадочная поверхность, 2 – продольная ось ВА,  $\alpha$  – угол наклона посадочной поверхности,  $\beta$  – угол отклонения продольной оси ВА от вертикали

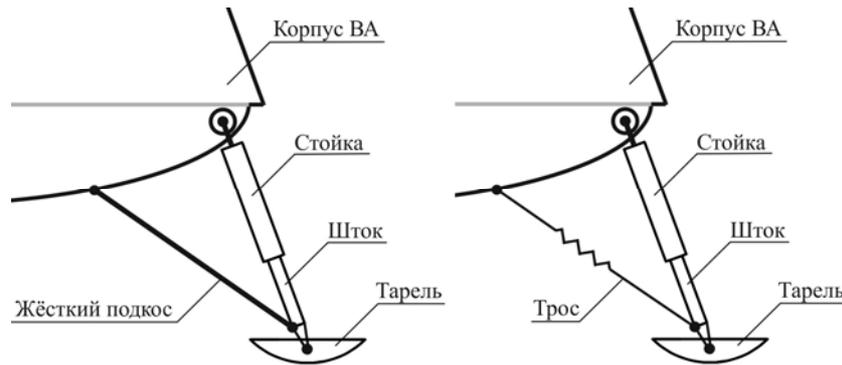


Рис. 2. Схемы посадочных опор

Как уже отмечалось, исследуются два варианта конфигурации ПУ стержневого типа – с «жёстким» подкосом и с тросом вместо подкоса (рис. 2). Трос может быть выполнен из сверхвысокомодульного материала типа кевлар.

Кинематическая схема и размеры опор ПУ принимаются с учётом зоны размещения посадочной опоры в агрегатном отсеке ВА, причем изначально посадочная опора находится в сложенном состоянии.

Необходимо отметить, что в отличие от схемы с жёсткими подкосами, для которой компоновочные возможности существенно ограничивают величину угла установки опоры  $\varphi$ , схема с тросами позволяет задавать практически любую величину  $\varphi$ , в том числе оптимальную (рис. 3).

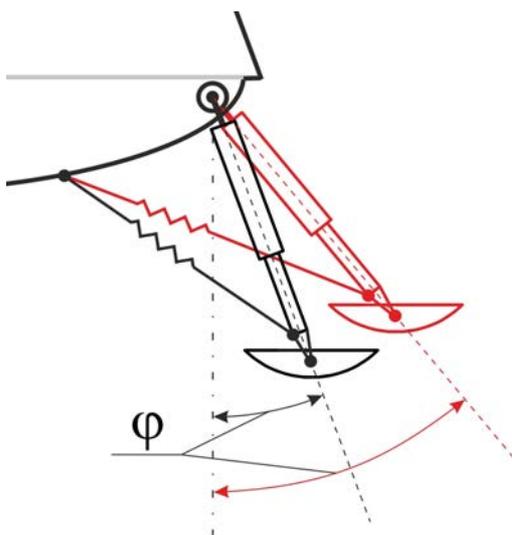


Рис. 3. Угол установки опоры с тросом относительно продольной оси ВА

В силу конструктивных ограничений ход амортизатора также является ограниченной величиной. Для каждой из схем ПУ проводилась серия оптимизационных расчётов по выбору энергетической характеристики амортизатора опоры (рис. 4). Для схемы с тросами оптимизировался и угол установки опоры  $\varphi$ .

После выбора оптимальных энергетических характеристик и угла установки опоры необходимо оценить устойчивость процесса посадки ВА и работоспособность ПУ для обеих схем.

Под работоспособностью ПУ понимается не превышение располагаемого хода штока телескопической стойки. При движении штока внутри стойки происходит сжатие амортизирующего элемента (например, сотовой конструкции), и при полном его сжатии (выработке хода) шток встаёт на упор, что может вызвать недопустимо высокие нагрузки на ВА.

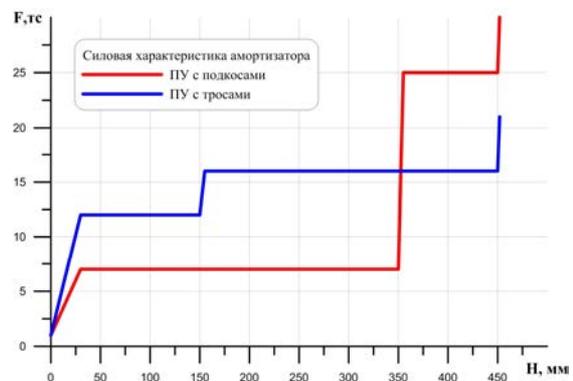


Рис. 4. Силловая характеристика амортизатора

Немаловажным фактором работоспособности является положительное значение клиренса, т.к. в противном случае происходит контакт корпуса ВА с посадочной поверхностью, что не соответствует требованию по обеспечению многозаповности и «мягкости» процесса посадки.

### Анализ устойчивости и работоспособности

При заданных характеристиках ВА на устойчивость его движения влияют следующие основные параметры:

- угловая скорость ВА в момент первого контакта с поверхностью;
- линейная скорость центра масс ВА в тот же момент;
- ориентация ВА относительно посадочной поверхности;
- угол наклона посадочной поверхности;
- свойства грунта.

Как уже отмечалось, к моменту первого контакта опор ПУ с поверхностью ВА обладает скоростью (для рассматриваемого случая значение вертикальной скорости составляет не более 3 м/с, а максимальное значение горизонтальной скорости, обусловленное скоростью ветра, достигает 15 м/с).

Штатным условиям посадки, когда система управления ВА отрабатывает без отказов, соответствует диапазон для вертикальной ( $V_6$ ) и горизонтальной ( $V_2$ ) скоростей в пределах от 0 до 3 м/с. Все большие по значению линейные скорости отнесены к нештатным условиям.

Устойчивость процесса посадки определяется в виде зависимости горизонтального компонента скорости  $V_2$  от угла наклона посадочной поверхности  $\alpha$  для трёх фиксированных значений вертикальной скорости  $V_6$  (т.е. в каждом из трёх случаев для всего диапазона значений начальной горизонтальной скорости в качестве начальной вертикальной скорости выбиралось фиксированное значение: 0 м/с; 1,5 м/с; 3 м/с; угол отклонения продольной оси ВА от вертикали  $\beta$  составлял  $6^\circ$ , угловая

скорость относительно центра масс ВА в момент первого контакта с грунтом равна  $6,25^\circ/\text{с}$ ).

Область устойчивости ВА строится следующим образом. При фиксированных значениях  $\alpha$  и  $V_6$  проводится серия расчётов процесса посадки для монотонно увеличивающихся значений горизонтальной скорости. Значение  $V_2$ , при котором происходит опрокидывание ВА, даёт соответствующую точку с координатами  $(\alpha, V_2)$  на границе области устойчивости.

Задав исходные условия, актуальные для рассматриваемых конфигураций ПУ, можно получить соответствующие области устойчивости.

Для ВА, оборудованного ПУ с жёсткими подкосами (рис. 2), получена область устойчивости (рис. 5). Анализ показал, что с точки зрения обеспечения устойчивости критичным является случай посадки на мягкие супесчаные грунты (коэффициент жёсткости грунта  $C_p=0,8 \cdot 10^6$  кгс/м<sup>3</sup>). Из зависимостей, изображённых на рис. 5, следует, что для случая штатной посадки, когда вертикальный и горизонтальный компоненты скорости не превышают каждый 3 м/с, а наклон посадочной поверхности  $\alpha$  не более  $5^\circ$ , посадочное устройство обеспечивает устойчивое движение без опрокидывания ВА. Однако возможны ситуации, когда горизонтальный компонент скорости  $V_2$  может иметь большее значение (например, вследствие отказов системы управления). В этом случае более приемлемым представляется использование схемы ПУ с тросами (рис. 2), рассмотренной в [9].

Область устойчивости для ПУ с тросами приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что устойчивая посадка обеспечивается при углах наклона посадочной поверхности  $\alpha$  до  $20-25^\circ$ .

Область работоспособности ПУ представляется в виде зависимости горизонтальной скорости ВА от угла отклонения  $\beta$  ВА. Расчёты проводилось при следующих начальных условиях: жёсткий грунт

( $C_p=60 \cdot 10^6$  кг/м<sup>3</sup>), угол наклона посадочной поверхности 5°, угловая скорость 12,5°/с.

На рис. 7 представлена область работоспособности для ПУ с подкосами. Аналогичная область работоспособности построена на рис. 8 для ПУ с тросами. Из областей, ограниченных графиками, видно, что

при средних вертикальных скоростях (~1,5м/с) ПУ с тросами работоспособно даже при значении горизонтальной скорости 15м/с, чего нельзя сказать про схему с подкосами, т.к. область работоспособности для ПУ с подкосами значительно уже.

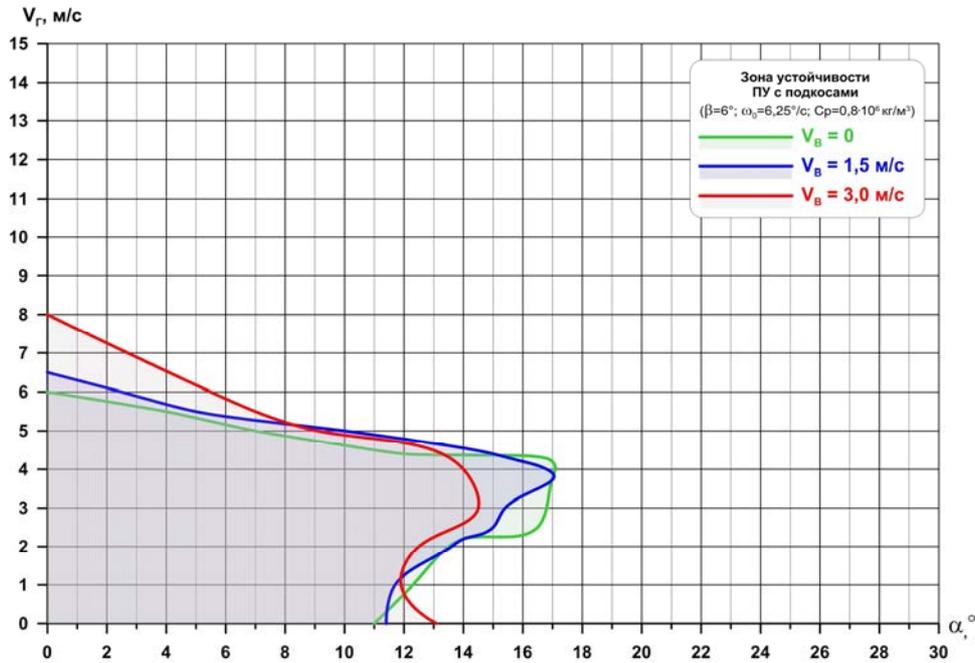


Рис. 5. Зона устойчивости ПУ с подкосами

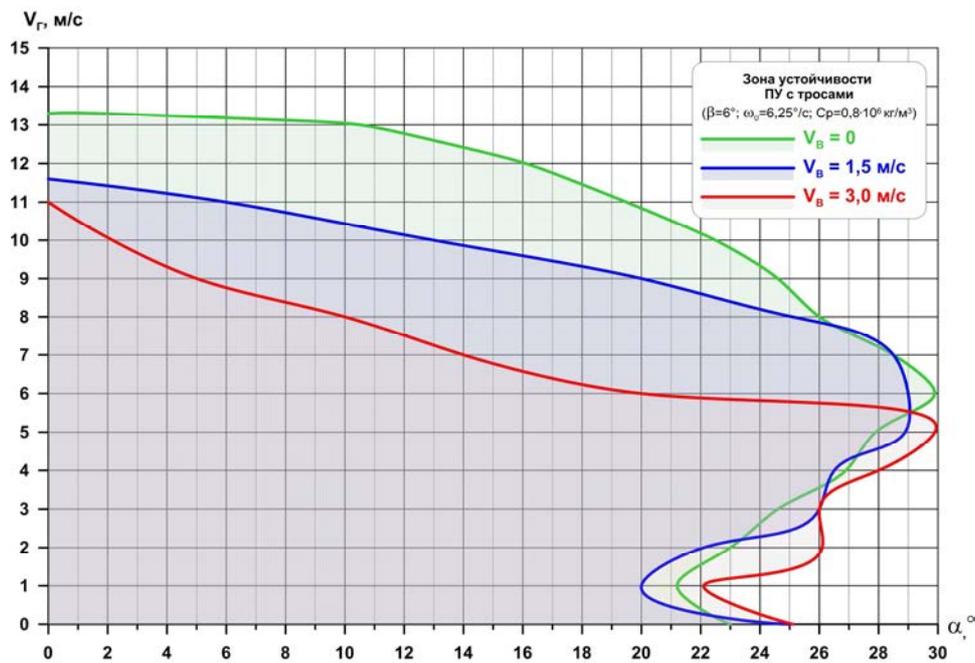


Рис. 6. Зона устойчивости ПУ с тросами

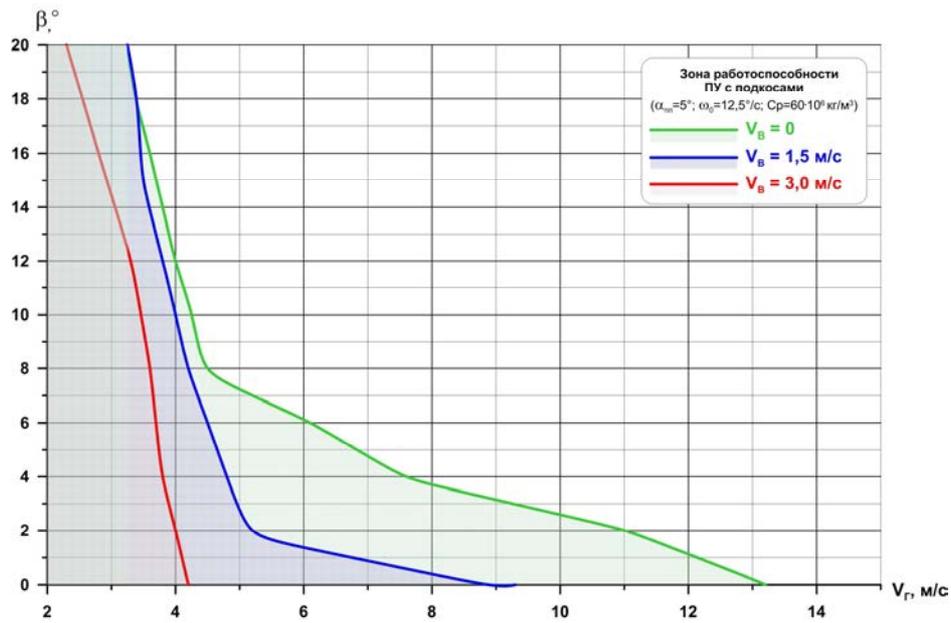


Рис. 7. Зона работоспособности ПУ с подкосами

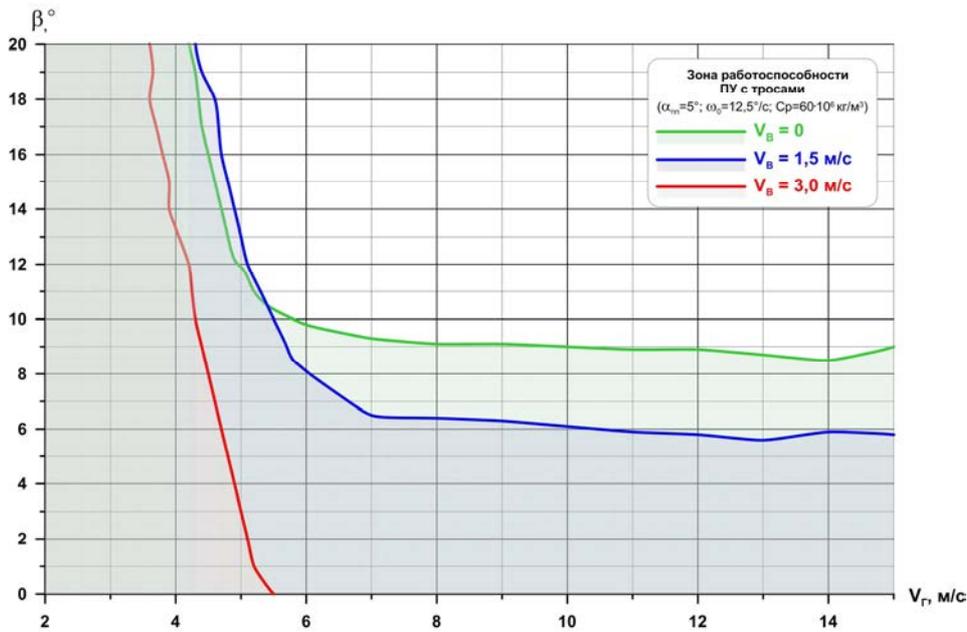


Рис. 8. Зона работоспособности ПУ с тросами

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- ПУ с подкосами работоспособно при штатных условиях посадки и частично при повышенных  $V_2$ , а ПУ с тросами работоспособно при штатных условиях и при повышенных  $V_2$  в более широком диапазоне;
- ПУ с подкосами обеспечивает устойчивость при штатных условиях посадки и частично при повышенных  $V_2$ , а как область устойчивости ПУ с тросами, помимо штатных условий, охватывает значи-

тельно большую область нештатных условий посадки: общая область устойчивости ПУ с тросами в 3,5 раза больше области устойчивости ПУ с подкосами;

- силовые профили амортизаторов позволяют в штатных условиях совершать посадку с учётом всех требований для обеих схем, однако в случае схемы с тросами энергоёмкость амортизатора гораздо выше, максимальное пороговое усилие ниже и, следовательно, реализуются более низкие нагрузки на конструкцию ВА.

**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. 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.

5. Буслаев, С.П. Прогнозирование успешной посадки автоматической межпланетной станции на поверхность небесного тела в условиях неопределенности

[Текст] / С.П. Буслаев // Космические исследования. – 1987. – Вып.2. – С. 186-192.

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

7. Борзых, С.В. Динамика взаимодействия трансформируемого механического посадочного устройства возвращаемого космического аппарата с посадочной поверхностью [Текст] / С.В. Борзых, В.В. Воронин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 69-79.

8. Воронин, В.В. Динамика процесса посадки спускаемого аппарата на участке его контакта с поверхностью [Текст] / В.В. Воронин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – №4(35). – С. 52-58.

9. Динамика процесса посадки космического аппарата с рычажно-тросовым посадочным устройством [Текст] / С.В. Борзых, В.Н. Бакулин, В.В. Воронин, В.В. Кокушкин // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – Т.19, №5. – С.45-50.

**ANALYSIS OF LANDING PROCESS DYNAMICS FOR DIFFERENT REENTRY VEHICLE LANDING DEVICE SUPPORT SCHEMES**

© 2013 S. V. Borzykh, V. V. Voronin, Y. N. Shchiblev

RSC “Energia” named after S.P.Korolyov

The paper presents a mathematical model of dynamics of the process of the reentry vehicle landing on the landing surface aimed at investigating the stability of motion and the landing device efficiency. The mechanical system, including the vehicle body and the landing device elements is a structure of absolutely rigid bodies with internal connections. A comparative analysis of the landing process is carried out for the optimal choice of the landing device configuration.

*Reentry vehicle, landing device, landing dynamics, stability of motion, performance, landing surface, clearance.*

### **Информация об авторах**

**Борzych Сергей Васильевич**, доктор технических наук, начальник отдела, открытое акционерное общество Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г. Королёв, Московская обл. Область научных интересов: моделирование и анализ структурно-сложных динамических систем.

**Воронин Виталий Викторович**, инженер, открытое акционерное общество Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г. Королёв, Московская обл. Область научных интересов: моделирование и анализ структурно-сложных динамических систем.

**Щиблев Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, открытое акционерное общество Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г. Королёв, Московская обл. Область научных интересов: моделирование и анализ структурно-сложных динамических систем.

**Borzykh Sergey Vasilyevich**, doctor of technical science, head of department, “Energiya” Rocket Space Corporation. Area of research: modeling and analysis of structurally complex dynamic systems.

**Voronin Vitaliy Victorovich**, postgraduate student, engineer of “Energiya” Rocket Space Corporation. Area of research: modeling and analysis of complex structural and dynamical systems.

**Shchiblev Yuriy Nicolayevich**, candidate of technical science, leading research associate, “Energiya” Rocket Space Corporation. Area of research: modeling and analysis of structurally complex dynamic systems.