

## Динамика посадки многоразового космического аппарата с механическим посадочным устройством на жесткий мерзлый грунт

© В.В. Кокушкин<sup>1</sup>, С.В. Борzych<sup>2</sup>, В.В. Воронин<sup>2</sup>,  
Н.К. Петров<sup>2</sup>, Ю.Н. Щиблев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

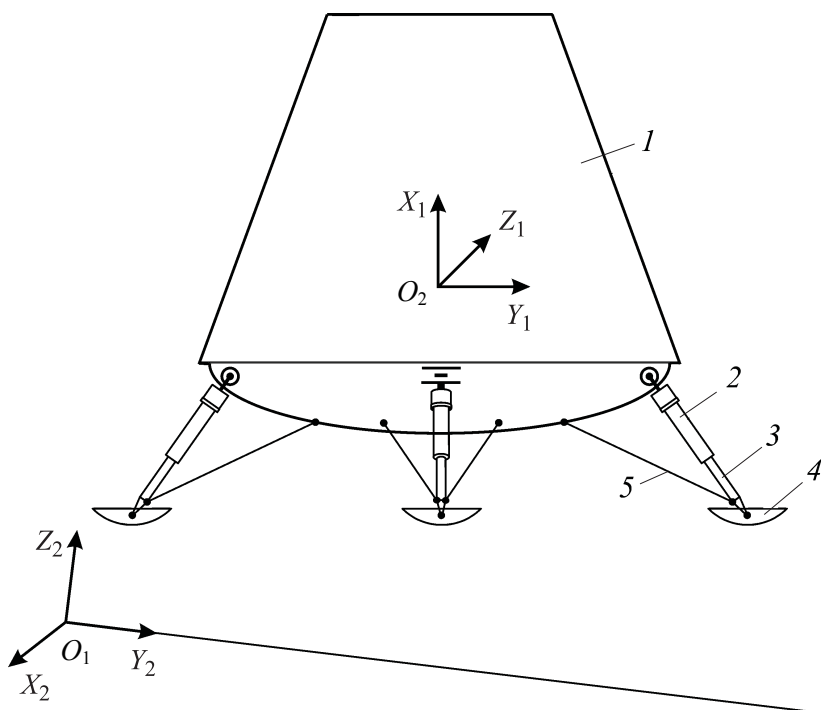
<sup>2</sup>РКК «Энергия», г. Королев, Московская область, 141060, Россия

*Разработана модель процесса посадки многоразового космического аппарата. Предложен способ определения реакций связей между элементами механического посадочного устройства и корпусом аппарата. Приведены зависимости для определения силы взаимодействия тарелки посадочного устройства с грунтом. Для наиболее критичного случая посадки аппарата на твердый мерзлый грунт представлены зависимости от времени характерных параметров, описывающих процесс посадки: параметры перегрузки, линейные и угловые скорости, клиренс, а также получены области устойчивости процесса посадки.*

**Ключевые слова:** многоразовый космический аппарат, динамика посадки, механические связи, модель грунта, перегрузка, устойчивость движения.

**Введение.** Процесс посадки многоразовых космических аппаратов (МКА) — ключевая заключительная операция полета, от которой зависит общий успех миссии. В момент касания посадочной поверхности МКА обладает весьма существенной остаточной кинетической энергией, которая гасится в процессе взаимодействия с поверхностью вплоть до полной остановки аппарата. Для МКА необходимо полностью исключить его контакт с грунтом посадочной поверхности, поэтому МКА снабжен посадочным устройством (ПУ), которое может иметь различную конструктивную реализацию [1–3]. В настоящей статье рассмотрена оригинальная модификация одного из самых распространенных типов ПУ — устройства пружинно-рычажного типа (рис. 1). Особенность рассматриваемого ПУ состоит в том, что в каждой из четырех его опор металлические подкосы заменены тросами [4].

Конструкция и характеристики ПУ должны не только обеспечить полное гашение остаточной кинетической энергии МКА, но и позволить выполнить ряд других требований к процессу посадки: непревышение перегрузкой заданных предельных значений [5]; обеспечение минимально необходимого клиренса; исключение возможности опрокидывания от момента первого контакта до полной остановки. Кроме того, конечное положение МКА должно гарантировать дальнейшее его функционирование (развертывание научной аппаратуры для проведения исследований, спуск автоматического планетохода, выход экипажа и т. д.).



**Рис. 1.** Схема аппарата с посадочным устройством:

1 — корпус аппарата; 2 — стойка; 3 — шток; 4 — тарель; 5 — трос;  $O_2X_1Y_1Z_1$  — система координат МКА;  $O_1X_2Y_2Z_2$  — система координат посадочной поверхности

**Постановка задачи и динамическая модель.** В процессе разработки МКА требуется принимать ряд ключевых технических решений, определяющих облик и характеристики ПУ, уже на самых ранних стадиях проектирования. Хотя в программе создания аппарата обязательно предусматривается комплексная наземная экспериментальная отработка [6, 7], в том числе и процесса посадки, это происходит, как правило, после выпуска рабочей документации и разработки экспериментальных макетов изделия. Поэтому на начальном этапе проектирования основным способом принятия обоснованных технических решений является математическое моделирование, связанное с проведением большого объема оптимизационных расчетов.

Предполагается, что каждая опора ПУ в качестве ключевого повторяющегося элемента включает в себя амортизатор, один конец которого крепится к корпусу, а другой — к тарели, непосредственно контактирующей с посадочной поверхностью (см. рис. 1). Каждый  $j$ -й амортизатор  $k$ -й тарели состоит из штока и стойки; внутри последней, как правило, находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты [8]).

Модель построена следующим образом. Корпус МКА, стойки, штоки, тарели рассматриваются как структурно сложная механиче-

ская система тел с внутренними голономными 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 МКА,  $k$ -й тарели,  $(k, j)$ -й стойки и штока) записываются уравнения движения центров масс (в инерциальной системе координат) и вращения относительно центров масс (в связанных системах координат тел)

$$m_i \bar{a}_i = \bar{F}_i, \quad (1)$$

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

где  $i$  — номер тела;  $m_i$  — его масса;  $\bar{a}_i$  — вектор ускорения центра масс;  $\bar{F}_i$  — главный вектор сил, действующих на тело, включая силы реакции связей;  $[J_i]$  — тензор инерции тела;  $\bar{\varepsilon}_i$  — вектор углового ускорения;  $\bar{\omega}_i$  — вектор угловой скорости;  $\bar{L}_{O_i}$  — главный вектор моментов относительно центра масс тела, включая моменты сил реакций связей и моменты связей.

**Уравнения связей.** Уравнения движения (1), (2) не могут быть сразу проинтегрированы, поскольку кроме внешних сил в них входят неизвестные силы и моменты реакций связей. Для их определения в точках контакта корпус МКА —  $(k, j)$ -я стойка,  $(k, j)$ -й шток,  $k$ -я тарель — записываются дополнительные уравнения связи [9].

Корпус МКА и  $(k, j)$ -я стойка соединены связью в виде сферического шарнира, запрещающего в точке связи линейные относительные перемещения. В соответствии с предложенным в данной статье подходом, движение каждого тела рассматривается отдельно. Тогда действие  $(k, j)$ -й стойки на корпус МКА учитывается в виде пространственной реакции (трех ее неизвестных проекций на какие-либо координатные оси). На стойку со стороны корпуса МКА действует сила, равная по модулю и противоположная по направлению. Уравнение для определения этой силы реакции связи основано на условии нерасхождения шарнирной точки контакта корпуса МКА и  $(k, j)$ -й стойки (далее индекс  $k, j$  опущен, рис. 2):

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

где  $\bar{r}_{\text{кор}}$ ,  $\bar{r}_{\text{ст}}$  — радиусы-векторы, определяющие положение центров масс соответственно корпуса МКА и стойки в инерциальной системе координат;  $\bar{r}_{\text{кор-ст}}$ ,  $\bar{r}_{\text{ст-кор}}$  — радиусы-векторы, определяющие положение точки контакта в связанных системах координат каждого из тел.

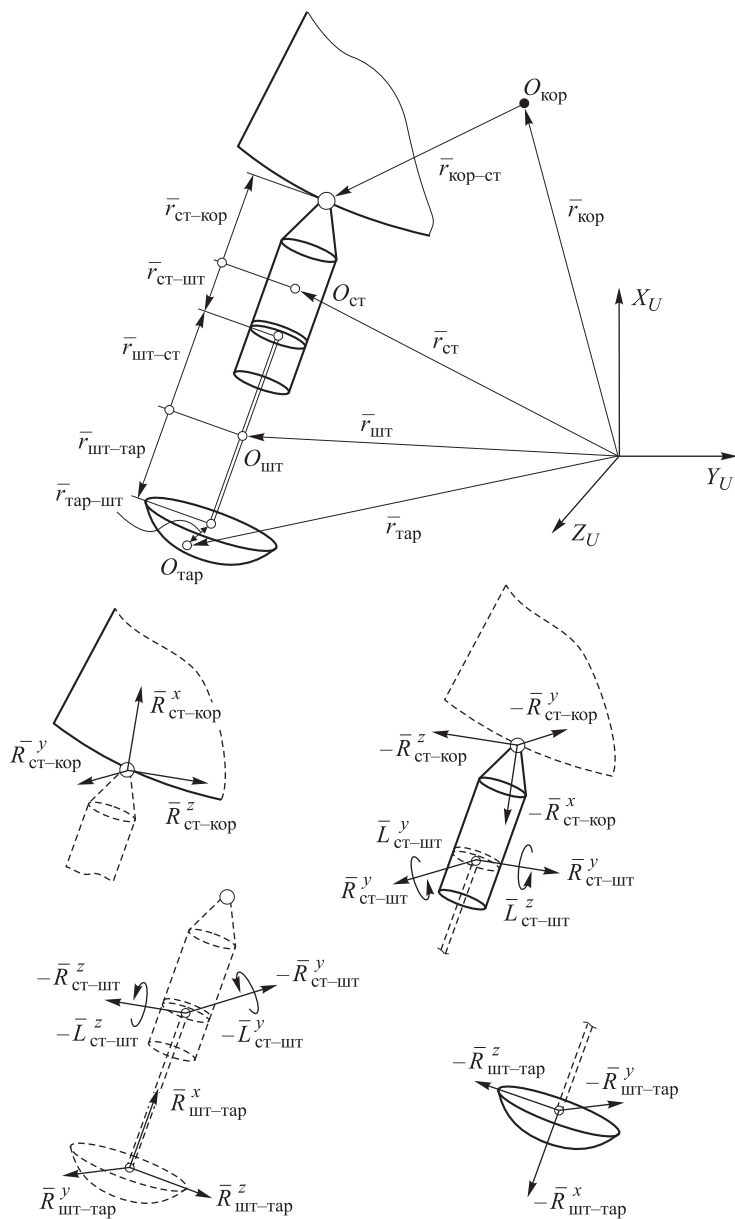


Рис. 2. Расчетная схема опоры посадочного устройства и структура реакций связей опоры посадочного устройства

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

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

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

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

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

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

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

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

Связь между стойкой и штоком допускает относительное проскальзывание вдоль общей продольной оси, а также относительный 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.

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

После двойного дифференцирования этого равенства имеем

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

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

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

Для штока аналогичные параметры определяются следующим образом:

$$\bar{a}_{\text{шт}} = m_{\text{шт}}^{-1} (\bar{F}_{\text{шт}} - \bar{R}_{\text{ст-шт}} + \bar{R}_{\text{шт-тар}}), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{\text{шт}} = [J_{\text{шт}}]^{-1} \{ & -\bar{\omega}_{\text{шт}} \times ([J_{\text{шт}}] \bar{\omega}_{\text{шт}}) + \bar{M}_{\text{шт}} (\bar{F}_{\text{шт}}) + \bar{r}_{\text{шт-ст}} \times (-\bar{R}_{\text{ст-шт}}) + \\ & + \bar{r}_{\text{шт-тар}} \times \bar{R}_{\text{шт-тар}} - \bar{L}_{\text{ст-шт}} \}. \end{aligned} \quad (10)$$

Локальная скорость

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

а радиус-вектор

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

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

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

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

Дифференцирование последнего равенства позволяет получить

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

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

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

Полученная система уравнений связи линейная относительно неизвестных компонент реакций связей  $\bar{R}_{\text{ст-кор}}$ ,  $\bar{R}_{\text{ст-шт}}$ ,  $\bar{R}_{\text{шт-тар}}$ ,  $\bar{L}_{\text{ст-шт}}$ . Эти вектора могут быть спроецированы из оси какой-либо системы координат (иногда для этого вводятся специальные системы координат связей). Размерность матрицы коэффициентов при неизвестных компонентах реакций связи равна  $10 \times j \times k$ .

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.).

**Моделирование посадки аппарата на твердый мерзлый грунт.** Рассмотрен наиболее тяжелый случай процесса посадки МКА — на

мерзлый твердый грунт. Для определения реакции на тарель со стороны грунтовой поверхности грунт при динамическом взаимодействии с тарелью рассматривался как условная сплошная среда без учета волновых процессов в грунтовом массиве и возникающих в нем инерционных сил. Была принята упруговязкая модель Фойгта [10, 11]. В качестве опорного элемента рассматривался сферический сегмент, для которого определена реакция грунта по нормали к поверхности, как функция геометрических параметров сегмента, глубины и скорости его внедрения в грунт и деформационных характеристик поверхности приземления.

Боковая реакция (по касательной к поверхности) определена как сила трения. В качестве коэффициента трения принят обобщенный коэффициент сопротивления горизонтальному перемещению опорного устройства по грунту, учитывающий силы трения пары тарель — грунт и смещение грунта вдоль поверхности.

Значения деформационных характеристик принятой реологической модели и коэффициента сопротивления горизонтальному перемещению были найдены экспериментально [8].

Выражение для напряжений в зоне контакта тарели с грунтом для модели Фойгта (см. рис. 2) записывается в виде:

$$\sigma = Cy_i + \eta y'_i, \quad (14)$$

где  $C, \eta$  — объемные коэффициенты жесткости и вязкости грунта соответственно;  $y_i$  — вертикальное перемещение  $i$ -й точки грунтовой поверхности в зоне контакта в функции времени;  $y'$  — скорость перемещения  $i$ -й точки грунтовой поверхности в функции времени.

Путем интегрирования эпюр напряжений по всей площади контакта получены выражения для реакции поверхности грунта, при вертикальном внедрении штампа ( $y'(t) \geq 0$ ):

$$R_y = C\Delta + \eta\Delta'. \quad (15)$$

Здесь  $\Delta$  — интегральная функция деформации грунта;  $\Delta'$  — ее производная по времени.

Вид интегральной функции деформации зависит только от формы опорной тарели и для этапа внедрения тарели в грунт определяется из выражения для тарели сферической формы

$$\Delta = \frac{\pi}{3} y^2 (3r - y), \quad (16)$$

где  $r$  — радиус сферы тарели.

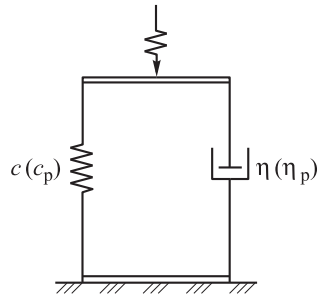
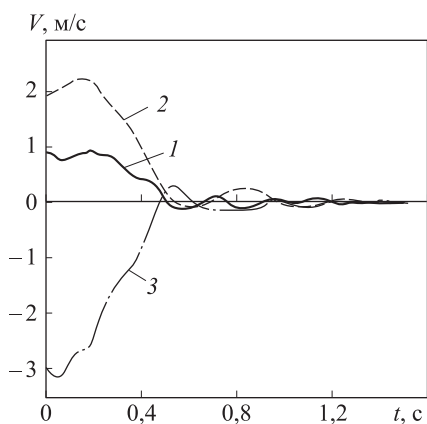


Рис. 3. Упруговязкая реологическая модель для описания ударного взаимодействия опорной тарели с грунтом

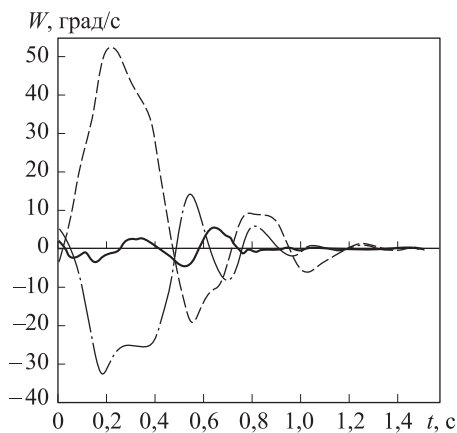
Выражение (16) справедливо при  $y \leq h_T$  (где  $h_T$  — высота тарели).

Расчеты проведены для тарели сферической формы с диаметром  $d_T = 0,6$  м и при значении  $C = 60 \cdot 10^6$  кгс/м<sup>3</sup>, что соответствует мерзлым тяжелым грунтам.

На рис. 4 и 5 показаны зависимости от времени компонент скорости центра масс МКА и его угловой скорости соответственно. Из этих рисунков следует, что интенсивное гашение энергии аппарата происходит примерно за 0,5 с, а полная остановка — через 1,4 с от момента первого касания опоры ПУ грунта. Вертикальная перегрузка (рис. 6) не превышает значения 2,6, что существенно меньше пределов переносимости человеком. Зависимость клиренса от времени (рис. 7) показывает, что требование об исключении контакта корпуса аппарата с посадочной поверхностью выполняется.



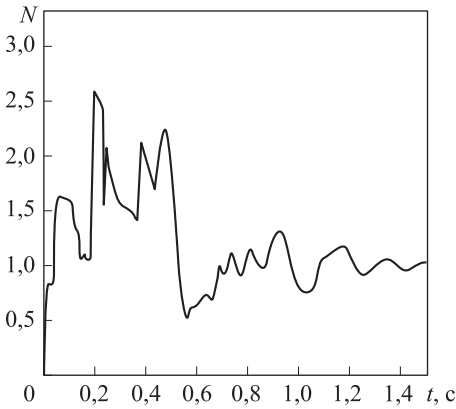
**Рис. 4.** Линейные скорости центра масс многоазового космического аппарата с момента первого контакта посадочного устройства с грунтом:  $V_x$  (—),  $V_y$  (---),  $V_z$  (-·-·-)



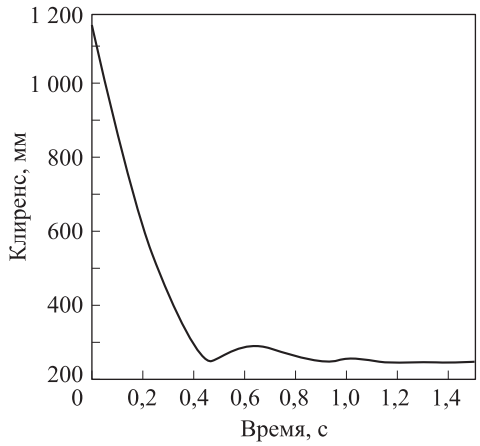
**Рис. 5.** Угловые скорости многоазового космического аппарата с момента первого контакта посадочного устройства с грунтом:  $\omega_x$  (—),  $\omega_y$  (---),  $\omega_z$  (-·-·-)

При определении размеров областей устойчивости ключевым условием является ограничение по рабочему ходу демпферов. На рис. 8 представлена зависимость работоспособности ПУ (под ней в данном случае понимается непревышение ходом демпферов предельного значения, т. е. отсутствие выхода штока на упор) в виде изменения горизонтальной скорости  $V_T$  МКА от угла отклонения  $\beta$  продольной оси МКА от вертикали при угле наклона плоскости поверхности  $5^\circ$ , угловой скорости МКА 12,5 °/с. Из рис. 8 следует, что при вертикальных скоростях ( $V_B \approx 1,5$  м/с) ПУ работоспособно даже при значении горизонтальной скорости, превышающей 15 м/с.

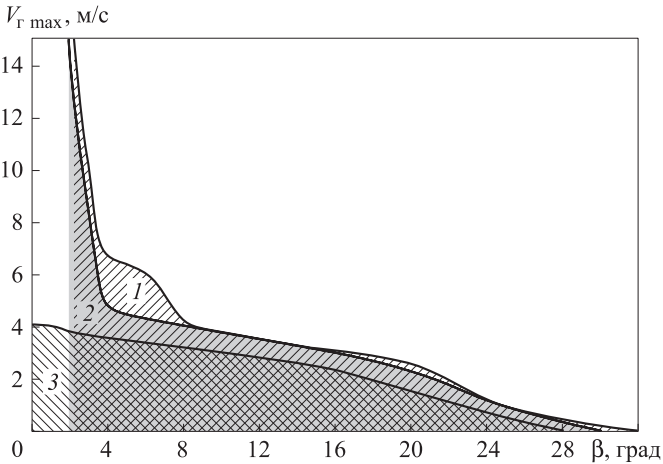




**Рис. 6.** Изменение перегрузки в процессе движения аппарата по грунту



**Рис. 7.** Изменение клиренса между корпусом аппарата и грунтом в процессе работы ПУ



**Рис. 8.** Зоны работоспособности посадочного устройства:  
 $V_{в} = 0$  (1),  $V_{в} = 1,5$  м/с (2),  $V_{в} = 3,0$  м/с (3)

**Выводы.** Исследована динамика посадки МКА на тяжелый мерзлый грунт, для чего разработана математическая модель процесса, включающая уравнения поступательного и вращательного движения корпуса МКА и элементов его посадочного устройства. Для определения реакций в узлах сочленения корпуса и элементов посадочного устройства записана специальная система уравнений связей. Приведены качественные характеристики процесса посадки, позволяющие контролировать выполнение специфических требований, предъявляемых к организации процесса посадки и характеристикам посадочного устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Базилевский А.Т., Григорьев Е.И., Ермаков С.Н. и др. *Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1985, 264 с.
- [2] Баженов В.И., Осин М.С. *Посадка космических аппаратов на планеты*. Москва, Машиностроение, 1978, 159 с.
- [3] Бакулин В.Н., Борзых С.В., Воронин В.В., Кокушкин В.В. Динамика процесса посадки космического аппарата с рычажно-тросовым посадочным устройством. *Вестник Московского авиационного института*, 2012, т. 19, № 5, с. 45–50.
- [4] Бакулин В.Н., Борзых С.В., Родионов О.Л., Марков М.В. Моделирование процесса мягкой посадки спускаемого аппарата, выполненного по схеме «несущий корпус». Тез. докл. 3-й *Межд. конф.* Москва, Изд-во МАИ, 2004, с. 71–72.
- [5] Рабинович Б.А. *Безопасность человека при ускорениях*. Москва, «Книга и бизнес», 2007, 208 с.
- [6] Микишев Т.Н. *Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1978, 248 с.
- [7] Буслаев 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.
- [8] Мак-Фарланд Р.К. Гексагональные сотовые конструкции под действием закритической осевой нагрузки. *Ракетная техника и космонавтика*, 1963, № 6, с. 125–131.
- [9] Бакулин В.Н., Борзых С.В., Воронин В.В. Математическое моделирование процесса посадки космического аппарата на участке его контакта с поверхностью. *Вестник Московского авиационного института*, 2011, т. 18, № 5, с. 211–218.
- [10] Григорян С.С. О приближенном решении некоторых задач динамики грунтов. *Прикладная математика и механика*, т. XXV. Москва, 1961, с. 867–884.
- [11] Вялов С.С. *Реологические основы механических грунтов*. Москва, Высшая школа, 1978, 477 с.

Статья поступила в редакцию 26.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кокушкин В.В., Борзых С.В., Воронин В.В., Петров Н.К., Щиблев Ю.Н. Динамика посадки многофазового космического аппарата с механическим посадочным устройством на жесткий мерзлый грунт. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1135.html>

**Кокушкин Вячеслав Вячеславович** родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор свыше 100 печатных работ в области прикладной механики. e-mail: kokushkin.fn-3.bmstu@yandex.ru

**Борзых Сергей Васильевич** — д-р техн. наук, профессор, начальник отдела открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева». Область научных интересов: прикладная механика и ракетостроение.

**Воронин Виталий Викторович** — аспирант, инженер открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева». e-mail: vitaliyvoronin@gmail.com

**Петров Николай Константинович** — заместитель генерального конструктора открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева». e-mail: elenani7@mail.ru

**Щиблев Юрий Николаевич** — ведущий научный сотрудник открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева». e-mail: elenani7@mail.ru