

## ПАРАШЮТНО-РЕАКТИВНАЯ СИСТЕМА МЯГКОЙ ПОСАДКИ С УПРУГИМ ЗВЕНОМ

**Журин С.В.**

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия»,  
ул. Ленина, 4А, Королёв, Московская обл., 141070, Россия  
e-mail: zhur\_serg@rambler.ru*

Теоретически исследуется процесс мягкой парашютно-реактивной посадки. Предлагается использовать длинное упругое звено для подвеса груза к парашюту. В результате анализа размерностей задачи выявлены безразмерные комплексы, описывающие процесс мягкой посадки. Построена упрощенная математическая модель, описывающая процесс мягкой парашютно-реактивной посадки с упругим звеном. В результате проведенных систематических численных исследований задачи выявлена достаточно простая взаимосвязь между безразмерными комплексами. Полученные зависимости можно использовать для предварительного проектирования. Использование упругого звена позволяет существенно (в разы) уменьшить тягу двигателей мягкой посадки; массового выигрыша в системе посадки в целом при этом нет.

*Ключевые слова:* парашют, парашютно-реактивная система, упругое звено, мягкая парашютная посадка.

### Введение

Парашютно-реактивные системы (ПРС) для десантирования грузов являются наиболее эффективным средством мягкой посадки, особенно для тяжёлых (10—20 т) и сверхтяжёлых (>20 т) объектов [1].

Отличительной особенностью ПРС от других парашютных систем (ПС) является наличие твердотопливного реактивного двигателя, который включается непосредственно перед посадкой, чтобы погасить остаточную вертикальную скорость. Для эффективного торможения тяга двигателя должна существенно превышать вес груза. При десантировании тяжёлых и сверхтяжёлых объектов приходится применять очень мощные реактивные двигатели, что влечёт за собой ряд эксплуатационных трудностей:

- значительное виброакустическое воздействие на посадочную площадку и сам десантируемый объект;
- механическое воздействие струи двигателя на место посадки, что может вызвать её частичное разрушение;
- значительное тепловое воздействие на окружающие объекты, что может вызвать пожар.

В данной работе предлагается в ПРС использовать в качестве подвеса длинное упругое звено, что позволяет применять двигатель существенно

(в разы) меньшей тяги и тем самым уменьшать негативное воздействие вышеперечисленных факторов. Проводятся анализ размерностей задачи мягкой посадки, а также систематические расчёты в упрощенной постановке.

### Анализ размерностей задачи парашютно-двигательной посадки с упругим звеном

На рис. 1 показана схема ПРС с упругим звеном. Отличительной особенностью предлагаемой

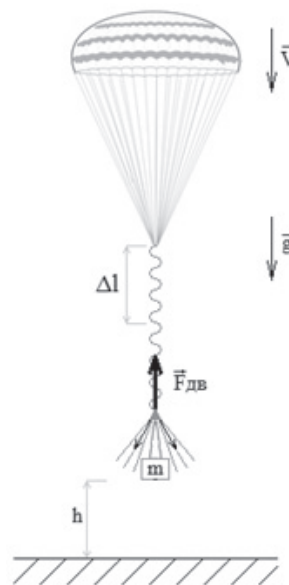


Рис. 1. Схема ПРС с упругим звеном

системы является наличие длинного упругого звена, соединяющего парашют и груз. В установившемся полёте все элементы движутся с равной вертикальной скоростью  $V$ . Под действием силы тяжести груза массой  $m$  упругое звено растянуто на величину  $\Delta l$ . По достижении грузом высоты  $h$  над посадочной поверхностью включается тормозная двигательная установка (ТДУ) с тягой  $F_{\text{дв}}$ . При работе ПРС традиционных схем парашют перестаёт оказывать тормозящее воздействие на груз практически сразу после включения ТДУ. В предлагаемой концепции груз дополнительно поддерживается силой упругости звена во время работы ТДУ, что позволяет применять двигатели с меньшей тягой.

Физический процесс мягкой посадки описывается следующими величинами:  $V$  — скорость установившегося движения ПРС до начала работы ТДУ (этот параметр заменяет собой геометрические параметры парашюта и свойства сплошной среды, в которой движется система), м/с;  $m$  — масса груза (массами парашюта и упругого звена пренебрегаем), кг;  $\Delta l$  — абсолютное удлинение упругого звена под действием силы тяжести груза массой  $m$  (этот параметр использовать удобнее, чем коэффициент жёсткости упругого звена), м;  $F_{\text{дв}}$  — вертикальная составляющая силы тяги двигателей, во многих ТДУ оси струй реактивных двигателей не совпадают с вертикалью, Н;  $h$  — высота над посадочной площадкой, при достижении которой включается ТДУ, м;  $\tau$  — время процесса торможения, с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, имеем семь физических параметров:  $V$  (м/с),  $m$  (кг),  $\Delta l$  (м),  $F_{\text{дв}}$  (Н),  $h$  (м),  $\tau$  (с),  $g$  (м/с<sup>2</sup>), которые состоят из трёх независимых физических величин: масса, длина, время. Согласно основной теореме анализа размерностей можно составить  $7 - 3 = 4$  безразмерных комплекса [2], которые будут описывать процесс мягкой парашютной посадки. Этими безразмерными величинами являются:

$$\frac{F_{\text{дв}}}{mg}; \tag{1}$$

$$\frac{h}{\Delta l}; \tag{2}$$

$$\text{Fr} = \frac{v^2}{gh}; \tag{3}$$

$$\text{Sh} = \frac{V\tau}{h}. \tag{4}$$

### Математическая модель

Для исследования закономерностей движения парашютной системы с упругим звеном используем упрощенную математическую модель взаимодействия двух материальных точек (парашют и груз), соединённых невесомым упругим подвесом:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h_{\text{г}}}{dt^2} = -mg + F_{\text{упр}} + F_{\text{дв}}; \\ m_{\text{п}} \frac{d^2 h_{\text{п}}}{dt^2} = F_a - F_{\text{упр}}. \end{cases} \tag{5}$$

Здесь  $h_{\text{г}}$ ,  $h_{\text{п}}$  — координаты (относительно поверхности Земли) груза и парашюта соответственно;  $m_{\text{п}}$  — масса парашюта;  $F_a$  — сила аэродинамического сопротивления парашюта, пропорциональная квадрату его скорости.

Рассматривается одномерное движение системы. Аэродинамическое сопротивление груза не учитывается. Примем допущение, что зависимость между напряжениями и деформациями в упругом звене линейная, т.е. при любых растяжениях справедлив закон Гука с постоянным коэффициентом жёсткости  $k$ :

$$F_{\text{упр}} = k(h_{\text{п}} - h_{\text{г}}). \tag{6}$$

Дополнив систему (5) начальными условиями, получаем задачу Коши, которую решаем любым из стандартных способов [3].

### Результаты математического моделирования

На рис. 2 показаны принципиальные схемы торможения у земли на двигателях мягкой посадки с жестким (слева) и упругим (справа) подвесами к парашюту. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат высота. Сплошными линиями показаны результаты расчётов — зависимости вертикальной координаты от времени для груза и парашюта. На оси абсцисс также показаны моменты времени включения двигателей  $t_{\text{вкл.дв}}$  и моменты времени посадки  $t_1$  и  $t_2$ .

Основные параметры в математической модели:  $m = 10^4$  кг,  $m_{\text{п}} = 200$  кг, аэродинамический коэффициент сопротивления и площадь парашюта выбраны такими, чтобы обеспечить вертикальную скорость снижения  $V = 12$  м/с, высота включения двигателей  $h = 17$  м.

Тяга двигателей, необходимая для полного торможения на этом пути для традиционной системы, составляет  $F_{\text{дв}} = 1,14mg$ .

Если в подвес включить упругий элемент, коэффициент жёсткости  $k$  которого такой, что его

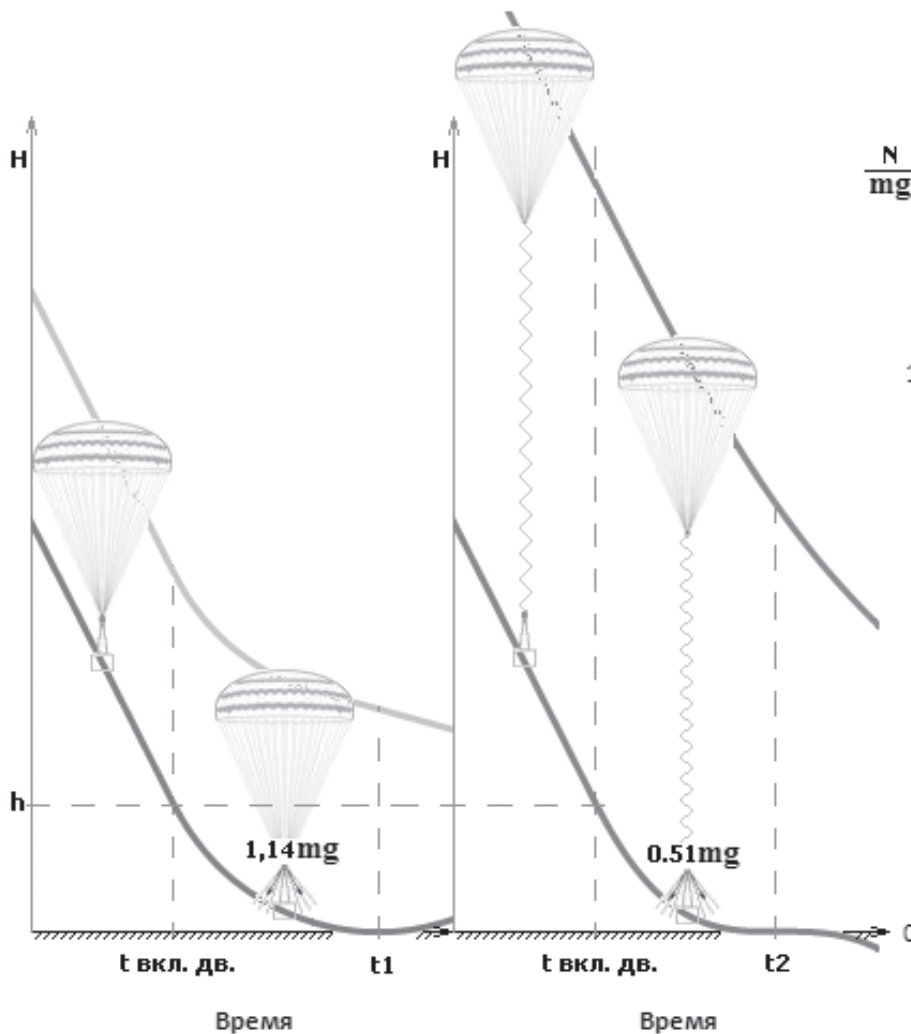


Рис. 2. Иллюстрация работы систем мягкой посадки с жёстким и упругим подвесами к парашюту. Тяга двигателей в случае жёсткого подвеса в 2,2 раза больше, чем в системе с упругим подвесом

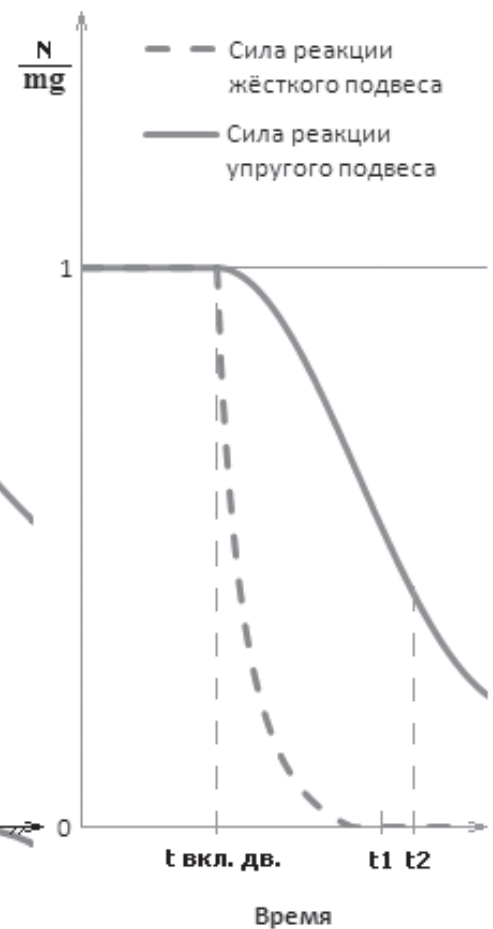


Рис. 3. Сила реакции жёсткого и упругого подвеса во время торможения двигателями мягкой посадки

удлинение в установившемся полёте составляет  $\Delta l = 50$  м (рис. 2, справа), то для торможения с той же высоты потребная тяга двигателей составляет  $F_{дв} = 0,51mg$ .

На рис. 3 приведена зависимость силы реакции подвеса от времени для первого и второго случаев, изображённых на рис. 2. До момента включения двигателей сила натяжения подвеса равна  $mg$ . После включения двигателей сила реакции жёсткого подвеса быстро падает, вплоть до нуля к моменту времени посадки  $t_1$ . В случае упругого подвеса сила натяжения во время торможения падает гораздо медленнее, и в рассмотренном случае к моменту посадки она составляет около  $0,4mg$ .

На рис. 4 показаны результаты систематических расчётов параметров движения парашютной системы с упругим подвесом. По оси абсцисс отложена тяга двигателей мягкой посадки, по оси ординат — высота, с которой осуществляется торможение. У

каждой кривой цифрами показано значение растяжения упругого элемента  $\Delta l$  в метрах. Кривые имеют вид гиперболы.

В случае  $\Delta l = 0$  (абсолютно жёсткий подвес) кривая имеет ярко выраженную асимптотику. При  $F_{дв}/mg = 1$  высота торможения стремится к бесконечности справа. Асимптотика означает то, что если тяга двигателей равна  $mg$ , то, теоретически, груз приобретёт определённую постоянную скорость и будет двигаться с ней бесконечно долго.

В случае  $\Delta l = \infty$  кривая имеет другую асимптотику  $F_{дв}/mg = 0$ . В этом случае во время торможения груз всё время поддерживается подвесом с силой  $mg$ . Тяга двигателей гасит только кинетическую энергию груза.

Между рассмотренными предельными случаями лежат кривые, полученные с промежуточными значениями удлинения  $\Delta l$ . Рассмотрим кривую

$\Delta l = 50$  м, она показана пунктирной линией с предельной точкой в районе  $h = 17$  м и  $F_{дв}/mg = 0,51$ . Каждая точка на кривой означает путь торможения груза при действии соответствующей тяги двигателей. Предельная точка соответствует параметрам, когда зависимость высоты от времени (рис. 2, справа) имеет точку перегиба с нулевой производной в момент касания земли. При параметрах любой другой точки на кривой  $\Delta l = 50$  м груз после касания земли способен «подлететь» вверх при работающих с постоянной, меньшей силы веса груза, тягой двигателей. Продолжение кривой выше предельной точки не имеет смысла, так как при этих параметрах груз не затормозится до нулевой скорости.

Для каждого конкретного значения удлинения  $\Delta l$  наибольший эффект снижения тяги тормозных двигателей достигается в определенной предельной точке. На рис. 4 все предельные точки для кривых

точек показывает, что с хорошей точностью можно определить достаточно простые соотношения между безразмерными величинами:

$$\frac{h}{\Delta l} = A \frac{F_{дв}}{mg}, \quad A = 0,65 \div 0,8; \tag{7}$$

$$Fr = \frac{v^2}{gh} = B \frac{F_{дв}}{mg}, \quad B \approx 1,7; \tag{8}$$

$$Sh = \frac{V\tau}{h} = 2,4 \div 2,8. \tag{9}$$

Соотношения (7), (8) можно использовать для предварительного проектирования ПРС с упругим звеном.

На рис. 8 показаны зависимости абсолютного удлинения  $\Delta l$  от соотношения  $\frac{F_{дв}}{mg}$  при трёх ско-

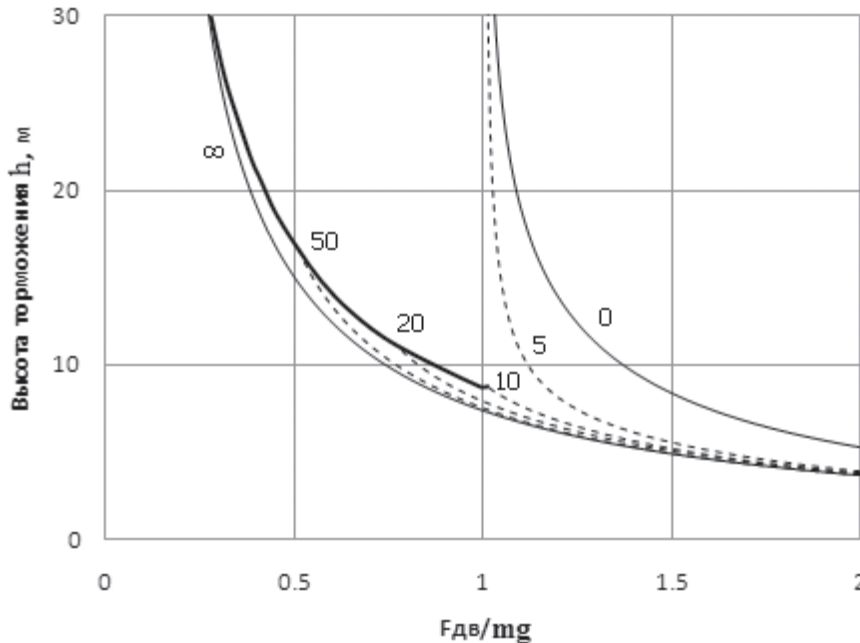


Рис. 4. Зависимость высоты торможения от тяги двигателей. У каждой кривой числом обозначено удлинение упругого элемента  $\Delta l$  в метрах

с  $\Delta l$  в диапазоне от 10 м до  $\infty$  обозначены жирной линией. Эта кривая связывает наиболее выгодное соотношение абсолютного удлинения упругого подвеса, высоты торможения и тяги двигателей.

В парашютной системе с рассмотренными параметрами упругий подвес с абсолютным удлинением менее 10 м не даёт возможности существенно уменьшить тягу тормозных двигателей.

**Обобщение результатов систематических расчётов**

На рис. 5—7 показаны результаты систематических расчётов работы ПРС в координатах безразмерных комплексов (1)—(4). Характер распределения

ростях снижения:  $V = 6; 12; 18$  м/с. Допустим, требуется уменьшить тягу двигателя до значения  $F_{дв} = 0,4mg$ . Для обеспечения мягкой посадки необходимо применить упругое звено с удлинением  $\Delta l = 20$  м для скорости  $V = 6$  м/с,  $\Delta l = 90$  м для скорости  $V = 12$  м/с и  $\Delta l = 200$  м для скорости  $V = 18$  м/с.

На рис. 9 показаны зависимости высоты торможения  $h$  (аналогичные жирной кривой на рис. 4) от параметра  $\frac{F_{дв}}{mg}$  для скоростей снижения 6, 12 и 18 м/с. У каждой кривой числами обозначены зна-

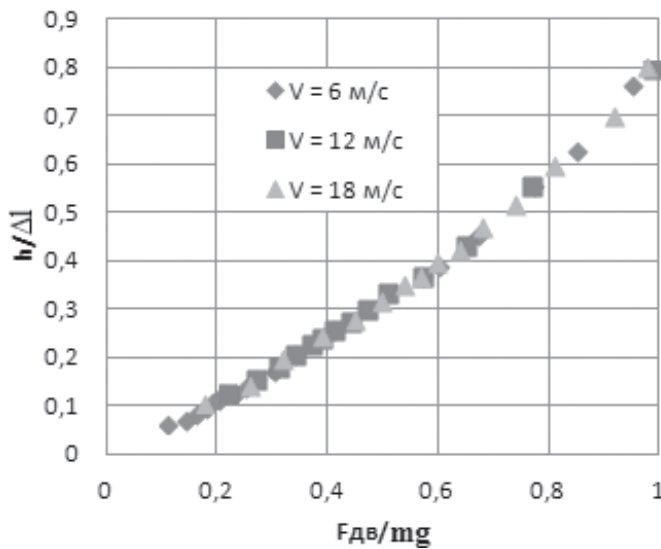


Рис. 5. Зависимость  $\frac{h}{\Delta l}$  от  $\frac{F_{дв}}{mg}$

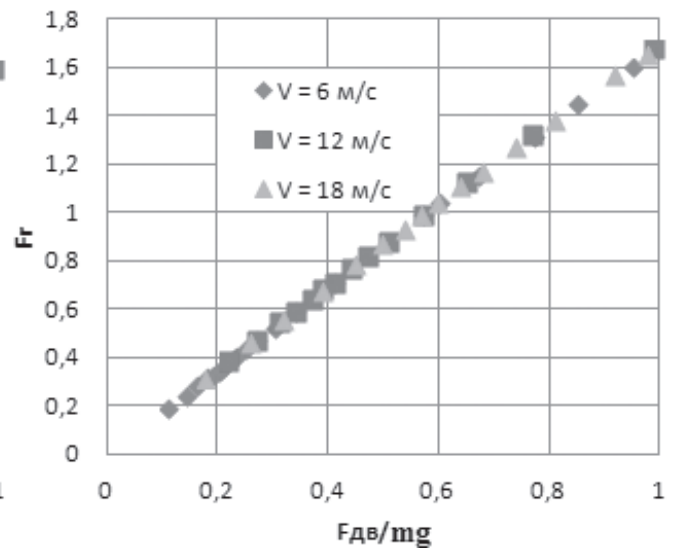


Рис. 6. Зависимость  $\frac{v^2}{gh}$  от  $\frac{F_{дв}}{mg}$

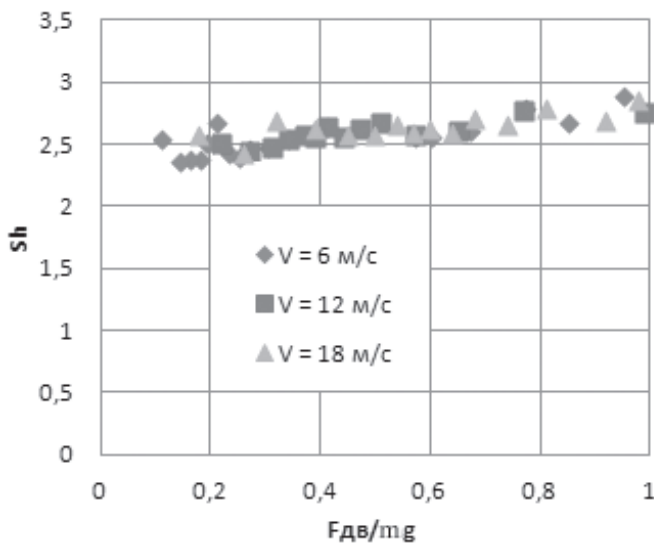


Рис. 7. Зависимость  $\frac{V\tau}{h}$  от  $\frac{F_{дв}}{mg}$

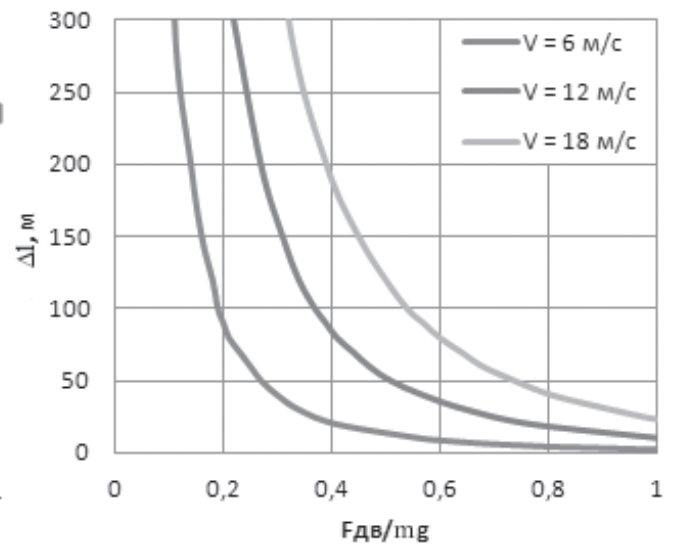


Рис. 8. Зависимость  $\Delta l$  от  $\frac{F_{дв}}{mg}$

чения абсолютного удлинения упругого элемента  $\Delta l$ . Чем больше скорость снижения, тем выше лежит соответствующая кривая. С уменьшением тяги двигателя возрастает путь торможения. При значении тяги двигателя  $F_{дв}/mg = 1$  каждая кривая заканчивается в точке с минимальной длиной растяжения упругого подвеса. Эта длина равна 2,5, 10 и 23 м соответственно для скоростей снижения 6, 12 и 18 м/с.

На рис. 10 приведена оценка массовой эффективности ПРС с упругим звеном в зависимости от параметра  $\frac{F_{дв}}{mg}$  для начальной скорости снижения  $V = 18$  м/с.

Массовая доля парашюта в зависимости от скорости снижения приведена в работе [4]. Для  $V = 18$  м/с её значение составляет 0,045.

Упругое звено считаем резиновым жгутом. Его масса пропорциональна  $\Delta l$  и оценивается исходя из следующих характеристик: относительное удлинение равно 4, модуль Юнга резины 5 МПа, плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Масса твердотопливного двигателя пропорциональна произведению тяги на время работы. Исходя из данных [5] о современных ПРС, был оценен коэффициент пропорциональности:

$$m_{ду} = 0,006 F_{дв} \tau. \tag{10}$$

На рис. 11 показаны зависимости отношения масс всех элементов ПРС к массе груза от высоты торможения  $h$  для скоростей снижения 6, 12 и 18 м/с. Для каждого значения скорости приведены две ветви: верхняя для ПРС без упругого звена,



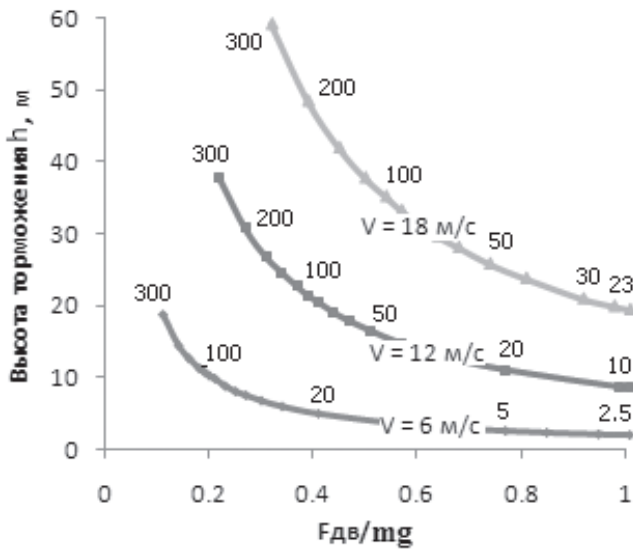


Рис. 9. Зависимость высоты торможения от параметра  $\frac{F_{дв}}{mg}$  для различных значений установившейся вертикальной скорости

нижняя для ПРС с упругим звеном. С увеличением высоты торможения все ветви монотонно возрастают, что говорит о снижении массовой эффективности ПРС.

На рис. 12 показаны зависимости отношения масс всех элементов ПРС к массе груза от параметра  $\frac{F_{дв}}{mg}$  для скоростей снижения 6, 12 и 18 м/с. С уменьшением тяги двигателей массовая эффективность монотонно падает. Допустим, требуется уменьшить тягу двигателя до значения  $F_{дв} = 0,4mg$ . При этом по сравнению с ПРС без упругого звена

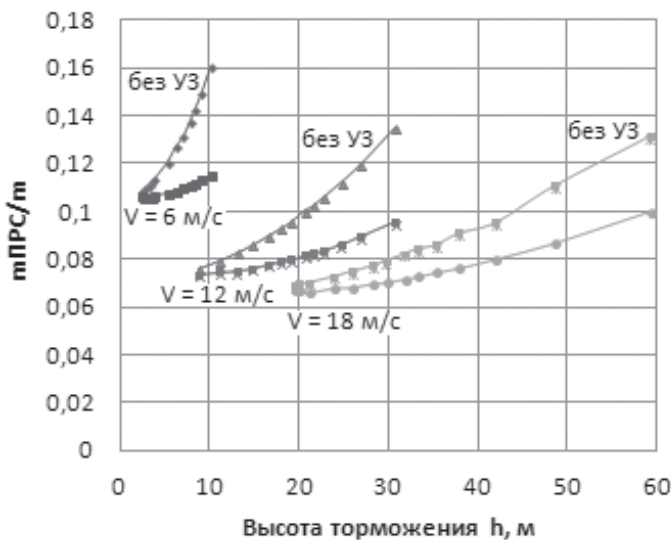


Рис. 11. Зависимость суммарной массовой доли ПРС от высоты торможения  $h$

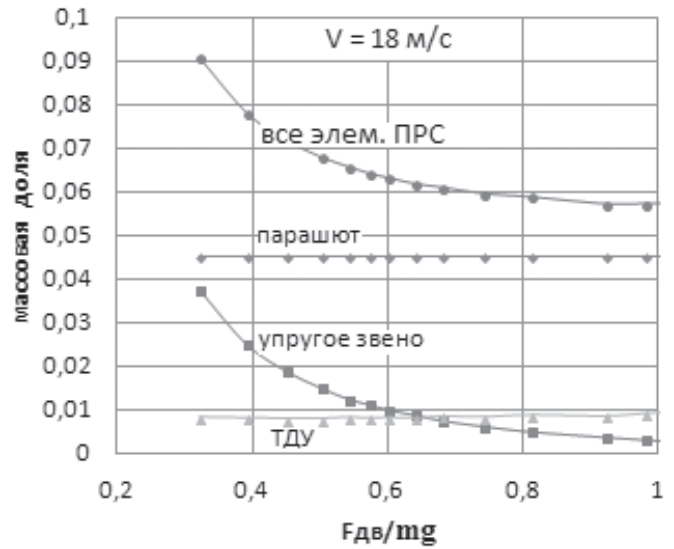


Рис. 10. Массовая доля каждого элемента ПРС при установившейся скорости  $V = 18$  м/с. Нормируется на массу груза  $m$

(значения  $\frac{m_{ПРС}}{m}$  при  $\frac{F_{дв}}{mg} = 1$ ) суммарная масса всех элементов ПРС вырастет на 1% для скорости  $V = 6$  м/с, на 12% для скорости  $V = 12$  м/с и на 30% для скорости  $V = 18$  м/с.

**Выводы**

1. Проведенные расчетные исследования на основе принятой упрощенной математической модели показывают, что использование в ПРС упругого звена позволяет существенно, в несколько раз, уменьшить тягу двигателей мягкой посадки.

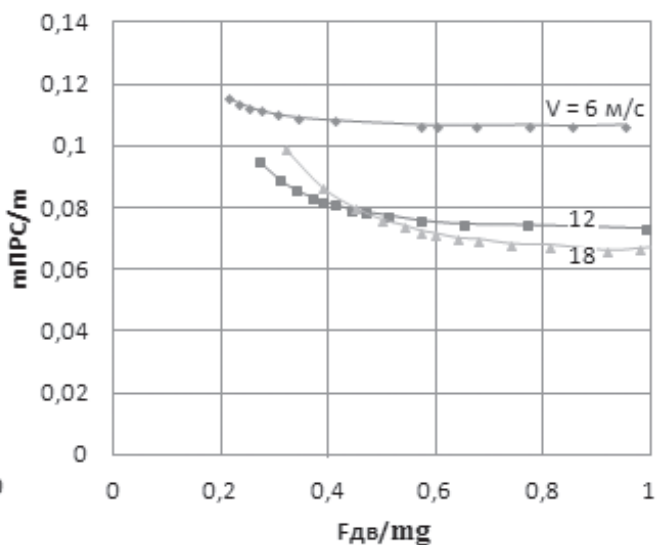


Рис. 12. Зависимость суммарной массовой доли ПРС с упругим звеном от параметра  $\frac{F_{дв}}{mg}$

2. При использовании в ПРС упругого звена выигрыша в массе нет.

3. Применение упругого звена даёт возможность более полно удовлетворить требование унификации существующих ПРС с возможностью непрерывной (не дискретной) настройки параметров системы под заданную массу десантируемого объекта.

**Библиографический список**

1. Морозов В.И., Пономарев А.Т., Животов Н.П., Морозов А.А. Парашютно-реактивные системы. Состоя-

ние и перспективы развития // Полёт. 2000. №11. С. 27-37.

2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1977. — 440 с.

3. Косарев В.И. 12 лекций по вычислительной математике (вводный курс): Учеб. пособие для вузов. — М.: МФТИ, Физматкнига, 2000. — 224 с.

4. Лобанов Н.А. Основы расчёта и конструирования парашютов. — М.: Машиностроение, 1965. — 364 с.

5. Федосеев С. Парашютно-десантная техника «Универсала» // Техника и вооружение (научно-популярный журнал, индекс 71186). 2011. №3. С. 2-8.

**PARACHUTE-JET SOFT LANDING SYSTEM WITH ELASTIC LINKAGE**

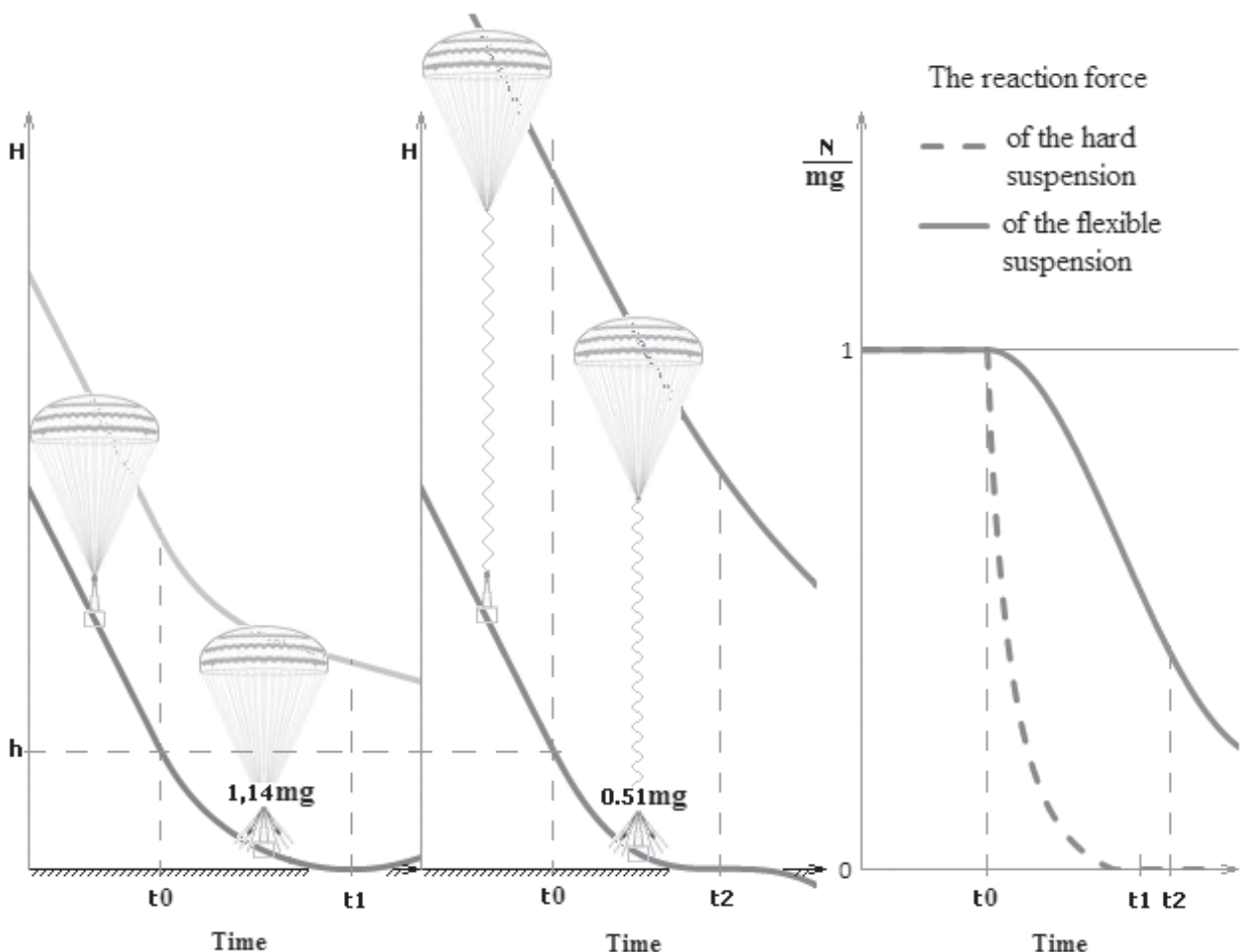
**Zhurin S.V.**

Rocket-Space Corporation «Energia»,  
4A, Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia  
e-mail: zhur\_serg@rambler.ru

**Abstract**

The article is devoted to theoretical study of the soft parachute-jet landing process. It proposes to use a long elastic linkage to suspend a load to the parachute.

Figura illustrates the operation of the parachute-jet landing system with elastic linkage. The engine thrust in the case of a hard suspension is 2.2 times greater than in the case of an elastic suspension.



The results of dimensions analysis for this problem reveal dimensionless groups, describing the process. A simplified mathematical model is built to describe the process of soft parachute-jet landing with an elastic linkage. As a result, of systematic numeric studies a rather simple interrelation between the dimensionless groups was found out. These obtained dependencies can be used for preliminary design.

Implementation of the elastic linkage allows significant reduction (several times) of soft-landing engines thrust. In its turn, it enables reduction of the following negative factors of soft-landing engines operation:

This enables you to reduce the following negative factors operation of the engines of soft landing:

- Significant vibroacoustic impact on a landing pad and airdropped object itself;
- Mechanical effect on a landing pad, which may cause its partial destruction;
- Considerable thermal effect of surrounding objects, which may cause a fire.

Implementation of elastic linkage for parachute-jet landing gives no mass advantage.

Application of the elastic linkage makes it possible to meet more fully the requirement on standardization of the existing parachute-jet soft landing systems with the possibility of continuous (not discrete) adjustment of system parameters to the given mass of an airdropped object.

**Keywords:** parachute, parachute-jet system, elastic linkage, soft parachute landing.

## References

1. Morozov V.I., Ponomarev A.T., Zhivitov N.P., Morozov A.A. *Fligh*, 2000, no. 11, pp. 27-37.
2. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* (Methods of similarity and dimensionality in mechanics), Moscow, Nauka, 1977, 440 p.
3. Kosarev V.I. *12 lektii po vychislitel'noi matematike <vvodnyi kurs>* (12 lectures on computational mathematics <introductory course>), Moscow, MFTI, Fizmatkniga, 2000, 224 p.
4. Lobanov N.A. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya parashyutov* (Fundamentals of calculation and design of parachutes), Moscow, Mashinostroenie, 1965, 364 p.
5. Fedoseev S. *Tekhnika i vooruzhenie*, 2011, no. 3, pp. 2-8.