

УДК 533.666.2: 629.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-29-38

## ПАРАШЮТНАЯ СИСТЕМА С УПРУГИМ ЗВЕНОМ И ТАНДЕМНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ГРУЗА НА ДВЕ ЧАСТИ

С.В. ЖУРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева,  
г. Королёв, Россия

Предлагается новый тип парашютной системы (ПС). Его отличительной особенностью является наличие упругого звена (УЗ) для подвески груза к парашюту, при этом сам груз разделяется на две части,  $m_1$  и  $m_2$ , сопоставимые по массе и подвешиваемые одна под другой. Грузы соединены тросом через механизм управления длиной троса. ПС в полете состоит из парашюта, растянутого УЗ, груза  $m_1$ , механизма управления длиной троса, троса, груза  $m_2$ . Основной особенностью данного типа ПС является возможность обеспечения малых динамических перегрузок груза  $m_1$  в течение всего полета, включая посадку. Для мягкой посадки груза  $m_1$  необходимо правильно подобрать основные параметры ПС: площадь парашюта, жесткость УЗ, массы грузов  $m_1$  и  $m_2$ , длину троса. Для подтверждения работоспособности и реализуемости предлагаемой концепции была спроектирована, изготовлена и испытана экспериментальная ПС полетной массой  $m \approx 10$  кг. Используется парашют из непроницаемой ткани раскройной площадью  $F_{\text{п}} = 2,2 \text{ м}^2$  с цилиндрической юбкой для придания устойчивости ПС в полете. В качестве УЗ используется силиконовая трубка длиной  $l_0 = 6$  м в нерастянутом состоянии, в полете, под весом грузов  $m_1$  и  $m_2$ , оно растягивается до  $l_0 + \Delta l \approx 17$  м. Масса груза  $m_1$  составляет  $m_1 \approx 5,5$  кг, груз  $m_2$  имеет массу  $m_2 \approx 4,5$  кг. Для поднятия ПС использовался двухместный мотодельтаплан. Сброс происходил с высоты  $H \approx 200$  м. Скорость снижения до посадки составила  $V_{\text{сн}} = 8\div 9$  м/с. Анализ результатов записи динамических перегрузок показывает, что в течение всего полета, включая посадку, суммарная перегрузка груза  $m_1$  не превысила  $n = 5$ . Тем самым подтверждаются работоспособность, реализуемость и заявленные свойства предлагаемого типа ПС.

**Ключевые слова:** парашютная система, упругое звено, мягкая посадка.

### ВВЕДЕНИЕ

Парашюты начали активно использовать в начале XX века с развитием воздухоплавания и авиации в качестве средства спасения пилота при вынужденном покидании летательного аппарата во время полета [1–2]. Основной задачей спасательного парашюта в этой ситуации является сохранение жизни и здоровья человека.

В первой половине 1930-х годов парашюты стали использоваться для безопасного десантирования грузов [3]. За прошедшее время в отечественной и зарубежной практике создано множество грузовых парашютных систем (ПС) различных назначений и схем функционирования [4–5]. Наиболее часто для десантирования грузов применяются неуправляемые баллистические парашюты с малым аэродинамическим качеством. При этом используется их основное свойство – гашение вертикальной составляющей скорости за счет действия на купол тормозящей аэродинамической силы для уменьшения ударных перегрузок при приземлении (здесь и далее под динамической перегрузкой  $n$  будем понимать отношение модуля силы реакции опоры к модулю силы тяжести объекта). Классическим типам грузовых ПС присущи следующие традиционные недостатки:

– повышенные динамические перегрузки при наполнении куполов (для уменьшения перегрузок применяют ПС с несколькими каскадами и рифление куполов);

- низкая скорость снижения влечет за собой значительное время полета, что увеличивает ветровой снос и вероятность обнаружения противником (для уменьшения влияния этих негативных эффектов применяют сброс с низких высот);
- достаточно высокая для приземления вертикальная скорость вызывает значительные динамические перегрузки при ударе о посадочную площадку (для их уменьшения применяют амортизаторы и реактивные твердотопливные двигатели);
- ограничение на скорость приземного ветра для уменьшения перегрузок и вероятности опрокидывания десантируемого груза при посадочном ударе.

## НОВЫЙ ТИП ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ

Динамические перегрузки в момент посадки десантируемого объекта на парашюте являются функцией вектора скорости, жесткости конструкции и упруго-пластических свойств грунта посадочной площадки [6]. Настоящая работа посвящена уменьшению наиболее значимого параметра при посадке – скорости десантируемого объекта в момент касания. Для этого предлагается *новый* тип парашютной системы<sup>1</sup>. На рис. 1 показаны ее основные составные части. Для подвеса груза к парашюту предлагается использовать длинное упругое звено (УЗ)<sup>2,3</sup>. Груз разделяется на две части  $m_1$  и  $m_2$ , они соединены тросом через механизм управления длиной троса. ПС в полете состоит из парашюта, растянутого УЗ, груза  $m_1$ , механизма управления длиной троса, троса, груза  $m_2$ . Основной особенностью данного типа ПС является возможность обеспечения малых динамических перегрузок груза  $m_1$  в течение всего полета, включая посадку. Для мягкой посадки груза  $m_1$  необходимо правильно подобрать основные параметры ПС: площадь парашюта, жесткость УЗ, массы грузов  $m_1$  и  $m_2$ , длину троса.

Предлагаемый тип ПС снижает влияние вышеперечисленных недостатков классических грузовых ПС:

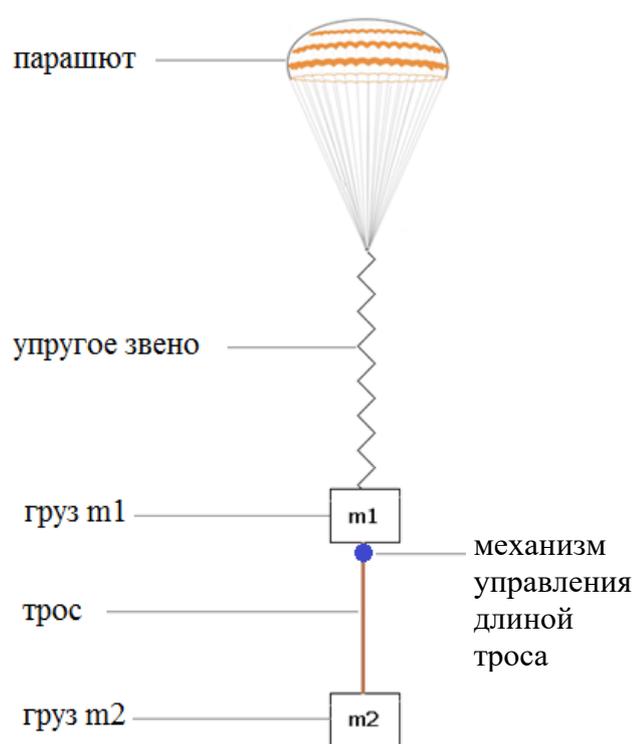
- перегрузки при наполнении купола демпфируются упругим звеном;
- скорость снижения данного типа ПС не является посадочной скоростью полезного груза  $m_1$ , поэтому может заметно превышать скорость снижения большинства грузовых ПС;
- вертикальная скорость груза  $m_1$  в процессе посадки (после касания грузом  $m_2$  поверхности) гасится за счет действия УЗ, сила упругости которого становится нескомпенсированной, после того как груз  $m_2$  коснулся поверхности;
- в определенный момент после касания груза  $m_2$  поверхности механизмом управления длиной троса происходит натяжение троса и происходит «якорение» груза  $m_1$  грузом  $m_2$ , тем самым гасится горизонтальная составляющая скорости груза  $m_1$ .

Груз  $m_2$  касается посадочной поверхности с вертикальной составляющей скорости, равной установившейся скорости снижения ПС, и испытывает при этом значительные динамические перегрузки. В качестве груза  $m_2$  может применяться полезная нагрузка, для конструктивной целостности которой динамические перегрузки не критичны. При необходимости для груза  $m_2$  могут применяться амортизаторы, как при использовании классических средств десантирования.

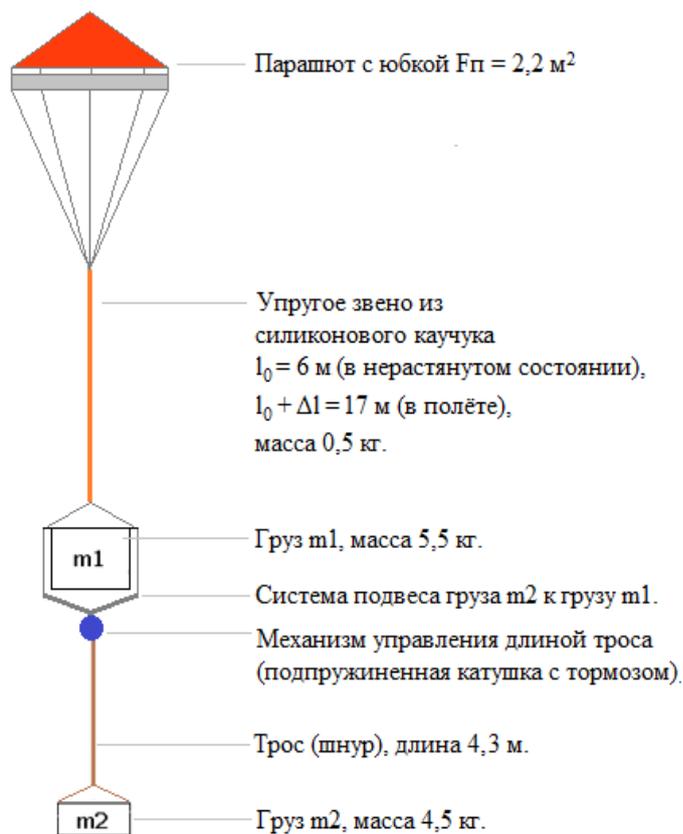
<sup>1</sup> Пат. 2600028 РФ. Устройство для парашютной посадки груза на посадочную поверхность / А.В. Белошицкий, С.В. Журин, П.А. Пахмутов, Т.Н. Швед; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королева». Оpubл. 22.09.2016.

<sup>2</sup> Пат. 2429165 РФ. Устройство для мягкой парашютной посадки груза на посадочную поверхность / А.В. Белошицкий, С.В. Журин, Т.Н. Швед, Н.Н. Цветкова; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королева». Бюл. № 26 от 20.09.2011.

<sup>3</sup> Пат. 2429991 РФ. Устройство для мягкой парашютной посадки груза на посадочную поверхность / Н.А. Брюханов, А.В. Белошицкий, С.В. Журин, М.Н. Решетников; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королева». Заявл. 04.05.2010. Оpubл. 27.09.2011. Бюл. № 27.



**Рис. 1.** Схема парашютной системы с упругим звеном и тандемным разделением груза на две части  
**Fig. 1.** The scheme of the parachute system with the elastic link and the load tandemly divided into two parts



**Рис. 2.** Конструктивная схема экспериментальной ПС  
**Fig. 2.** Design scheme of the experimental PS

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПАРАШЮТНАЯ СИСТЕМА

Для подтверждения работоспособности и реализуемости предлагаемой концепции была спроектирована, изготовлена и испытана экспериментальная ПС, на рис. 2 показана ее конструктивная схема. На фотографиях рис. 3 можно видеть конструктивное исполнение ПС в уложенном виде (слева) и подготовленном к летному эксперименту (справа). Используется парашют из непроницаемой ткани раскройной площадью  $F_{\Pi} = 2,2 \text{ м}^2$  с цилиндрической юбкой для придания устойчивости ПС в полете. В работе [7] показано, что при использовании неустойчивого парашюта движение протяженной по вертикали ПС происходит по спирали, что приводит к труднопредсказуемым кинематическим параметрам перед посадкой. В качестве УЗ используется силиконовая трубка длиной  $l_0 = 6 \text{ м}$  в нерастянутом состоянии, в полете, под весом грузов  $m_1$  и  $m_2$ , оно растягивается до  $l_0 + \Delta l = 17 \text{ м}$ . Груз  $m_1$  выполнен в виде ящика (см. фото рис. 3) с характерными размерами основания  $0,25 \times 0,25 \text{ м}$ , высотой  $0,15 \text{ м}$ , массой  $m_1 = 5,5 \text{ кг}$ . Система подвеса груза  $m_2$  к грузу  $m_1$  напоминает карданный механизм и служит для предания нужной ориентации груза  $m_1$  во время гашения горизонтальной скорости при посадке. Механизм управления длиной троса представляет собой подпружиненную катушку для шнура с тормозом (на фото рис. 3 не видна). Груз  $m_2$  имеет массу  $m_2 = 4,5 \text{ кг}$ . Внутри груза  $m_1$  расположена электронная система управления (СУ), в которую заложена программа полета. СУ реагирует на показания датчиков, выдает команды на исполнительные органы, фиксирует на внутреннем твердотельном носителе показания акселерометров. На груз  $m_1$

крепится смартфон HTC Desire S с встроенным приемником GPS. В полете на внутреннем твердотельном носителе смартфона программа GPSLogger записывает вычисленные траекторные параметры с частотой  $\nu \approx 1$  Гц.



Рис. 3. Фотографии ПС в уложенном виде (слева) и подготовленной к летному эксперименту (справа)  
Fig. 3. Photos of PS in the stacked form (left) and prepared for the flight experiment (right)

### ОПИСАНИЕ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Летный эксперимент проводился 28 августа 2018 года в 19 часов. Погодные условия: температура воздуха  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , штиль. Для поднятия ПС использовался двухместный мотodelьтаплан. Сброс происходил с высоты  $H \approx 200$  м на горизонтальной составляющей скорости полета  $V_{\Gamma} \approx 20$  м/с. По команде пилота испытатель ввел в поток укладку экспериментальной ПС, дальнейшая работа ПС происходила автоматически. При вводе парашюта срабатывает соответствующий контактный датчик, и с этого момента СУ начинает выполнять программу полета. В течение следующих 5 с последовательно происходят следующие события: наполнение купола парашюта, вытягивание УЗ из укладки, растяжение УЗ на максимальную длину, возвращение длины УЗ до рабочего значения, СУ выдает команду на разделение грузов  $m1$  и  $m2$ . После разделения грузов один повисает под другим на расстоянии  $h_0 \approx 0,5$  м. Далее СУ подает команды на механизм управления длиной троса и происходит дискретное стравливание шнура с катушки, один шаг длится 0,5 с, и за это время груз  $m2$  опускается относительно  $m1$  на  $\Delta h \approx 0,4$  м. Для разведения грузов на  $h = 4,3$  м требуется 8÷10 шагов. Далее происходит установившийся полет, вплоть до посадки (см. фото на рис. 4), скорость снижения составляет 8÷9 м/с. В момент касания земли грузом  $m2$  в механизме управления длиной троса срабатывает контактный датчик, и СУ переходит на алгоритм посадки. Через  $t_{\text{пос}} \approx 1$  с происходит посадка груза  $m1$ . В мо-

мент касания земли по команде СУ происходит отделение УЗ от груза m1. На рис. 5 показаны два кадра видеосъемки с верхней крышки груза m1 вверх на парашют до момента отделения УЗ и после него. Полет завершен.



Рис. 4. Экспериментальная ПС в полете  
Fig. 4. Experimental PS in flight



Рис. 5. Два кадра видеозаписи с верхней крышки груза m1 на парашют  
Fig. 5. Two frames of video from the top cargo m1 on the parachute

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 6 приведен график зависимостей траекторных параметров груза  $m_1$  в полете от времени, полученных при помощи GPS. Стрелками указаны моменты сброса и приземления груза  $m_1$  (моменты определены весьма условно из-за того, что СУ, видеокамеры и смартфон HTC Desire C не синхронизированы). По измерениям GPS высота падает примерно на 190 м за 25 с, отсюда средняя скорость снижения составляет  $V_{сн} \approx 7,6$  м/с. На кривой зависимости высоты от времени показаны точки в моменты фиксации параметров GPS. Видно, что на большей части полета точки распределены неравномерно, есть пропуски, что может свидетельствовать о повышенной погрешности работы GPS на этом участке. Причиной этого может служить то, что кинематические параметры груза  $m_1$  существенно меняются во время введения парашюта, УЗ, разделения грузов, опускания одного относительно другого. Только на интервале от 21 с до посадки в показаниях нет пропусков, т. е. работа GPS стабильнее и точность выше. Все графики для скорости показаны на этом интервале. Из-за большого временного шага между измерениями ( $\approx 1$  с) и невысокой точности данные по скорости приводятся до процесса гашения вертикальной скорости при помощи УЗ, изменение скорости в процессе мягкой посадки не приводится. Красной кривой на рис. 6 показаны данные GPS по абсолютной скорости, среднее значение составляет  $V \approx 8,1$  м/с. Синяя кривая соответствует вертикальной скорости, полученной дифференцированием показаний высоты по времени с помощью центрального разностного соотношения, среднее значение  $V_{сн} \approx 9,0$  м/с. Оранжевой кривой показано значение  $V_{сн} = 8,2$  м/с, полученное из анализа видеозаписи полета ПС (фрагмент одного кадра продемонстрирован на рис. 4). По результатам проведенного анализа можно заключить, что вертикальная скорость перед посадкой составляет  $V_{сн} = 8 \div 9$  м/с. Для получения более точных значений необходимо применение более точных методов измерения вертикальной скорости. Также на графике рис. 6 показана кривая для горизонтальной скорости перед посадкой, среднее значение составляет  $V_{г} \approx 2,3$  м/с.

На рис. 7 приведен график зависимости суммарной перегрузки груза  $m_1$  от времени в полете и при посадке. Вверху графика подписаны основные события и интервалы полета ПС. Через  $t_1 \approx 1$  с после ввода укладки ПС в поток происходит наполнение купола парашюта. Парашют вытягивает из укладки УЗ, и через  $t_2 \approx 2 \div 3$  с оно растягивается на полную длину. Перегрузки при этом не превышают  $n \approx 3,5$ . Далее происходит разделение грузов  $m_1$  и  $m_2$  и дискретное их разведение на разницу высот  $h = 4,3$  м. Перегрузки при разделении не превышают  $n \approx 4,5$ . Далее происходит установившийся полет вплоть до посадки, перегрузки  $n \approx 1$ . В момент касания груза  $m_2$  поверхности сила упругости УЗ оказывается нескомпенсированной (вес груза  $m_2$  уже не действует) и значение перегрузки груза  $m_1$  скачкообразно возрастает до значения  $n \approx 2$ , начинается процесс гашения вертикальной скорости груза  $m_1$  за счет работы УЗ. Через  $t_{\text{пос}} \approx 1$  с происходит посадка груза  $m_1$ , перегрузка достигает  $n \approx 4,5$ .

Анализ графика на рис. 7 показывает, что в течение всего полета, включая посадку, суммарная перегрузка груза  $m_1$  не превышает  $n = 5$ . Тем самым подтверждаются работоспособность, реализуемость и заявленные свойства предлагаемого типа ПС. Полученное экспериментальным путем значение максимальной перегрузки  $n \approx 4,5$  относится к конкретной экспериментальной ПС, оно может быть дополнительно снижено за счет проектной и конструктивной оптимизации. На сегодняшний день характерные перегрузки при работе наиболее совершенных отечественных грузовых ПС достигают  $n \approx 15$  [8].

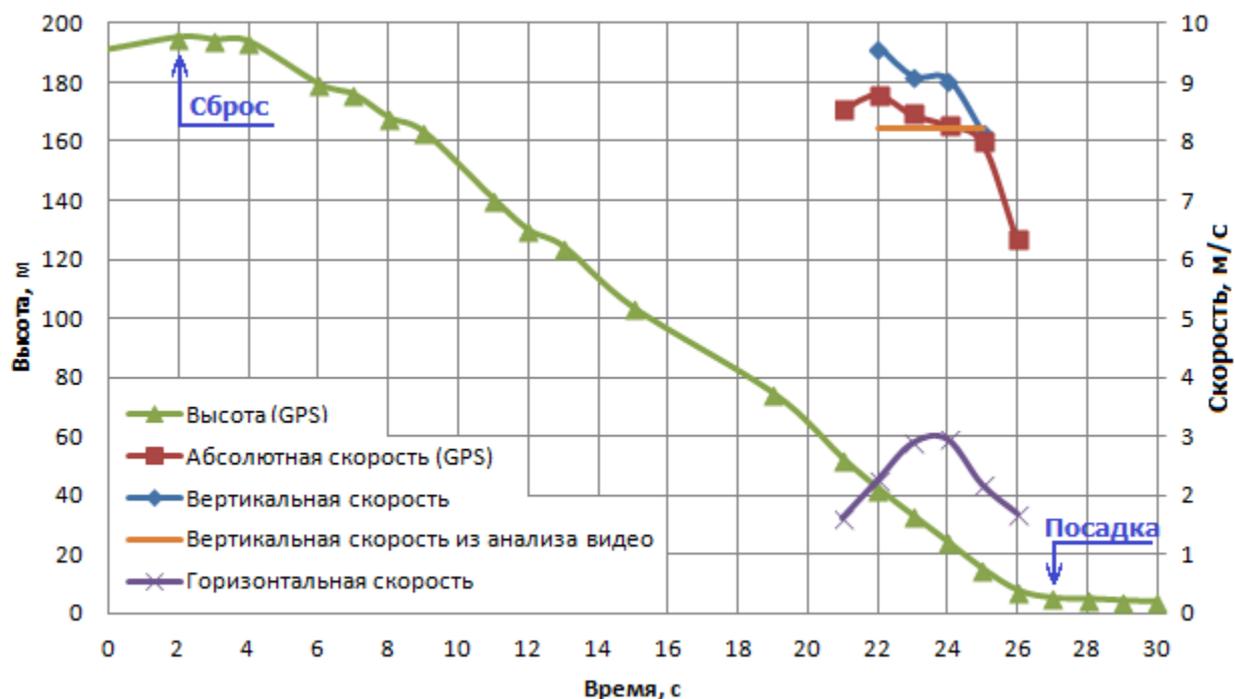


Рис. 6. Траекторные параметры, полученные при помощи GPS  
Fig. 6. Trajectory parameters obtained using GPS



Рис. 7. Зависимость перегрузки груза m1 во время полета и посадки  
Fig. 7. Dependence of load factor m1 during flight and landing

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по данной работе заключаются в следующем.

- Предложен *новый* тип ПС с упругим звеном и тандемным разделением груза на две части. Основной его особенностью является возможность обеспечить малые динамические перегрузки верхнего груза во время всего полета, включая посадку.

- Реализуемость и работоспособность предлагаемого типа ПС показана на примере экспериментальной ПС с полетной массой  $m \approx 10$  кг, в летном эксперименте динамическая перегрузка верхнего груза не превысила  $n = 5$ .

Для решения практических задач с помощью предлагаемого типа ПС требуются дополнительные исследования ее свойств по следующим направлениям:

- оптимизация схемы функционирования и конструктивных параметров узлов введения в действие ПС с УЗ, снижение перегрузок при наполнении купола и при введении УЗ;
- организация разделения грузов, схема функционирования устройства опускания одного груза относительно другого;
- обеспечение устойчивого полета ПС с УЗ, исследование причин возникновения и характеристик колебаний составных элементов ПС;
- исследование причин и механизмов уменьшения продольной угловой скорости вращения груза  $m_1$  в полете;
- подбор параметров для гашения вертикальной составляющей скорости груза  $m_1$  при посадке;
- подбор параметров для гашения горизонтальной составляющей скорости груза  $m_1$  при посадке;
- подбор конструктивных параметров для гашения угловой скорости и обеспечения нужной ориентации груза  $m_1$  при посадке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Когутов И.Л.** Парашют для привязного аэростата. Петроград, 1917. 36 с.
2. **Анощенко Н.Д.** О парашютах // Труды аэростатного отдела «Летучей лаборатории». Сб. № 1. 1918. 32 с.
3. **Федосеев С.** Парашютно-десантная техника «Универсала» // Техника и вооружение: вчера, сегодня, завтра. 2010. № 8. С. 2–12.
4. **Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т.** Парашютные системы. Проблемы и методы их решения: монография. М.: Физматлит, 2009. 576 с.
5. **Knacke T.W.** Parachute Recovery Systems Design Manual. Santa Barbara: Para Publishing, 1992. 487 p.
6. **Рабинович Б.А.** Безопасность космонавта при посадочном ударе спускаемого аппарата о грунт. М.: Книга и бизнес, 2014. 278 с.
7. **Журин С.В., Леонов С.В., Мехоношин Ю.Г.** Обработка и анализ данных натурального эксперимента по определению характеристик движения круглого парашюта по траектории в виде спирали на больших высотах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 71–78.
8. **Федосеев С.** Парашютно-десантная техника «Универсала». Средства десантирования ПБС-950 // Техника и вооружение: вчера, сегодня, завтра. 2012. № 2. С. 33–37.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Журин Сергей Викторович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела аэрогазодинамики и теплообмена Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королева, zhur\_serg@rambler.ru.

## THE PARACHUTE SYSTEM WITH THE ELASTIC LINK AND THE LOAD DIVIDED INTO TWO PARTS AS A TANDEM

Sergey V. Zhurin<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>*Korolev Rocket and Space Public Corporation "Energia", Korolev, Russia*

### ABSTRACT

The article suggests a new type of the parachute system (PS). Its distinctive feature is the presence of an elastic link (EL) for attaching the cargo to the parachute, and the cargo itself is divided into two parts,  $m_1$  and  $m_2$ , comparable in weight and suspended one under the other. The cargo is connected by a cable through the cable length control mechanism. PS in flight consists of a parachute, stretched EL, cargo  $m_1$ , the cable length control mechanism, cable, cargo  $m_2$ . The main feature of this type of PS is the ability to provide low dynamic overloads of  $m_1$  cargo during the entire flight, including landing. For a soft landing of  $m_1$  cargo, it is necessary to choose the main parameters of the PS correctly: the parachute area, the EL stiffness, the weight of  $m_1$  and  $m_2$  cargo, the length of the cable. To confirm the efficiency and feasibility of the proposed concept, an experimental PS with a flight mass of  $m \approx 10$  kg was designed, prepared and tested. The parachute is made of zero porosity fabric, its area is  $S = 2.2$  m<sup>2</sup>. It has a cylindrical skirt that is used to give stability to the PS in flight. As an EL a silicone tube is used with the length of  $l_0 = 6$  m when unstretched, but in flight under the weight of cargo  $m_1$  and  $m_2$  it is stretched to  $l_0 + \Delta l \approx 17$  m. The mass of the cargo  $m_1$  is  $m_1 \approx 5.5$  kg,  $m_2$  cargo has a mass of  $m_2 \approx 4.5$  kg. To raise the PS a two-seat hang-glider was used. The drop occurred from the height of  $H \approx 200$  m. The rate of decent before landing was  $V_e = 8...9$  m/s. The analysis of the final records of dynamic overloads shows that during the entire flight, including landing, the total cargo overload  $m_1$  did not exceed  $n = 5$ . Thereby operability, feasibility and the declared properties of the offered type of PS are confirmed.

**Key words:** parachute system, elastic link, soft landing.

### REFERENCES

1. **Kogutov, I.L.** (1917). *Parashut dlya privyaznogo aerostata* [Parachute tethered to the balloon]. Petrograd, 36 p. (in Russian)
2. **Anoschenko, N.D.** (1918). *O parashutakh* [About parachutes]. *Trudy aerostatnogo otdela «Letuchey laboratorii»* [Proceedings of a balloon department "Letuchey laboratorii"]. Sb. № 1. Moscow, 32 p. (in Russian)
3. **Fedoseev, S.** (2010). *Parashyutno-desantnaya tekhnika «Universala»* [Parachute equipment of "Universal"]. *Tekhnika i vooruzheniye: vchera, segodnya, zavtra* [Engineering and weaponry: yesterday, today, tomorrow], no. 8, Pp. 2–12. (in Russian)
4. **Lyalin, V.V., Morozov, V.I. and Ponomarev, A.T.** (2009). *Parashyutnye sistemy. Problemy i metody ikh resheniya* [Parachute system. Problems and methods of solution]. *Monografiya* [Monograph]. Moscow: Fizmatlit, 576 p. (in Russian)
5. **Knacke, T.W.** (1992). *Parachute Recovery Systems Design Manual*. Santa Barbara: Para Publishing. 487 p.
6. **Rabinovich, B.A.** (2014). *Bezopasnost kosmonavta pri posadochnom udare spuskayemogo apparata o grunt* [Astronaut safety during landing impact of the lander on the ground]. Moscow: Kniga i biznes, 278 p. (in Russian)
7. **Zhurin, S.V., Leonov, S.V. and Mekhonoshin, Yu.G.** (2015). *Obrabotka i analiz dannykh naturnogo eksperimenta po opredeleniyu kharakteristik dvizheniya kruglogo parashyuta po trayektorii v vide spirali na bolshikh vysotakh* [Processing and analysis of the data of the full-scale experiment to determine the characteristics of the round parachute movement along the pathway in the form of a spiral at high altitudes]. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 211, pp. 71–78. (in Russian)
8. **Fedoseev, S.** (2012). *Parashyutno-desantnaya tekhnika «Universala». Sredstva desantirovaniya PBS-950* [Parachute equipment of "Universal". Means of landing PBS-950]. *Tekhnika i vooruzheniye: vchera, segodnya, zavtra* [Engineering and weaponry: yesterday, today, tomorrow], no. 2, Pp. 33–37. (in Russian)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Sergey V. Zhurin**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Aero Gas Dynamics and Heat Transfer Department at S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation “Energia”, zhur\_serg@rambler.ru.

Поступила в редакцию 11.10.2018  
Принята в печать 17.01.2019

Received 11.10.2018  
Accepted for publication 17.01.2019