



Научная статья
УДК 629.7.038
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183584>
EDN: <https://www.elibrary.ru/NBOLAU>

Концептуальный подход к применению в системах разделения ракет-носителей замкового устройства шарикового типа без пиротехники

Алексей Вячеславович Кургузов¹, Владимир Юрьевич Ермаков^{2✉}, Ант Туфан³, Мария Васильевна Бирюкова⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

¹ mandigit@yandex.ru

² v_ermakov2003@mail.ru ✉

³ anttufan@gmail.com

⁴ mar_601_24@mail.ru

Аннотация. Представлен концептуальный подход к использованию замкового устройства шарикового типа в составе систем разделения перспективных многоразовых ракет-носителей. Сформулированы требования, задаваемые на уровне технического задания, такие как надёжность удержания рабочей нагрузки; надёжность срабатывания; быстродействие; энергия, затрачиваемая на срабатывание; отсутствие осколков после разделения и др. Исследованы различные аспекты конструкционной схемы, выбора технических параметров и особенности их применения, характерные для замкового устройства шарикового типа. Проведено экспериментально-математическое моделирование замкового устройства шарикового типа с учётом силы трения и износа элементов его конструкции с помощью специального программно-алгоритмического обеспечения.

Ключевые слова: замковое устройство шарикового типа, перспективные многоразовые ракеты-носители, система разделения ступеней, надёжность срабатывания, контактная прочность, напряженно-деформированное состояние

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF 2023 0007).

Для цитирования: Кургузов А.В., Ермаков В.Ю., Туфан А., Бирюкова М.В. Концептуальный подход к применению в системах разделения ракет-носителей замкового устройства шарикового типа без пиротехники // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 4. С. 55–64. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183584>

Original article

Conceptual Approach to Ball-Type Locking Device Application Without Pyrotechnics in the Launch Vehicle Stage Separation Systems

Aleksei V. Kurguzov¹, Vladimir Yu. Ermakov^{2✉}, Ant Tufan³, Mariya V. Biryukova⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russian Federation

¹ mandigit@yandex.ru

² v_ermakov2003@mail.ru✉

³ anttufan@gmail.com

⁴ mar_601_24@mail.ru

Abstract

The key role during space flights is the reliable payloads delivery to various orbits. The launch vehicle consists of the stages and parts that are able to separate from each other during the flight, for example, when emptying the tanks of the stages. The launch vehicle stages separation is a complex and fine-tuned process that includes rational application of various power coupling devices and separation systems intended for firm joint of the stages during the flight, as well as their reliable decoupling and moving apart to the specified distance at the specified time instance at the onboard control system command.

While decoupling process of the stages of prospective reusable launch rockets the issue of the decoupling systems application with account for their reusability arises. The main criteria of effectiveness herewith are the fragments forming prevention after separation, shock loads impact reduction during separation, as well as reliability increasing of the separation systems, which is an up-to-date and practically important problem.

One of the well-known separation systems is a ball-type locking device, which possesses a number of original factors that positively distinguish them from the devices based on other principles and, as the result, are widely applied in the existing structures, such as spring and pneumatic pushers, collet-, lever- and other types of locking devices. A ball-type locking device must meet, as a rule, the basic technical parameters and requirements, such as reliability of the workload holding; synchronicity of operation; speed; energy consumed for the operation; absence of fragments after separation, etc. To make a decision on the applicability of a ball-type locking device that meets the set problem, it is necessary to consider aspects affecting the effectiveness of their application.

The authors studied various aspects of the design scheme, technical parameters selection and its application specifics, characteristic of the ball-type locking device. They performed mathematical modeling, which analysis revealed significant impact of the pressure rise speed in the piston cavity and the stud shearing force on the trouble-free activation probability, which allows arranging corresponding arrangements on determining rational weight-and-size and structural characteristics of the system in total.

Experimental-and-mathematical modeling of a ball-type locking device has been performed with account for the friction force and wear of its structural elements. Its results allowed revealing that application of the steel SHKH15 balls with high strength characteristics and heat treatment, as well as application of special tension elements for uniform power loads distribution allowed significant reduction of maximum stress values and obtaining high activation synchronicity. Thus, the developed device can be employed as part of separation systems for the prospective reusable launch vehicles.

Keywords: ball-type locking device, promising reusable launch vehicles, stage separation system, reliable operation, contact strength, stress-strain state

Funding: the work was financed within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSFF 2023 0007)

For citation: Kurguzov A.V., Ermakov V.Yu., Tufan A., Biryukova M.V. Conceptual Approach to the Ball-Type Locking Device Application without Pyrotechnics in the Launch Vehicle Separation Systems. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 55–64. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183584>

Введение

Одними из основных частей любой ракеты-носителя (РН) является ее ступени и блоки, которые отделяются по мере того, как топливо в них заканчивается [1]. Разделение ступеней РН – это сложный и хорошо отлаженный процесс, который включает в себя использование различных устройств силовой связи и систем разделения (СР), предназначенных для прочного соединения ступеней во время полета, а также их надежного разделения и разведения на необходимое расстояние в необходимый момент времени по команде от бортовой системы управления (БСУ) [2, 3].

Одной из наиболее распространенных СР, используемых для разделения ступеней одноразовых РН, являются пиротехнические средства, которые расходуют энергию сгорания пиротехнических составов и распиливают элементы силовой конструкции для выполнения операций разделения [4, 5]. Они включают в себя пироболты, пиропатроны, пирозамки и пириножи. Пироболты представляют собой обычные болты с резьбой и шестигранной головкой, имеющие углубление, заполненное зарядом взрывчатого вещества, который при срабатывании разрушает болты и обеспечивает разделение ступеней [6, 7]. Пиропатроны и пирозамки разрушаются при подаче электрического импульса от БСУ и могут использоваться в качестве воспламенительного средства или источника газа давления для создания усилия, необходимого в процессе разделения ступеней. Пириножи относятся к одноразовым средствам, способным разъединять электро-, радио- и пневмосвязи перед разделением ступеней. Разъединение производится путем механического разрезания связей ножом, приводимым в движение пороховыми газами при срабатывании пиропатронов. При этом разрезаемые линии должны быть обесточены, а пневмосвязи – без избыточного давления [8, 9].

Пиротехнические средства имеют ряд преимуществ, таких как простота конструкции, низкий расход энергии инициирующего импульса тока, высокоточное регулирование интенсивности действия и возможность обеспечения заданного периода задержки на срабатывание [10]. Основными недостатками применения пиротехнических средств в конструкции СР являются: большие ударные нагрузки, возникающие при срабатывании пиротехнических средств малой мощности; высокая вероятность образования большого количества высокоскоростных металлических осколков и высокотемпературных продуктов детонации, воздействующих на близлежащие элементы конструкции РН; необходимость установки большого количества пиротехнических средств для разделения элемен-

тов конструкции перспективных РН по большому периметру, особенно многоразовых [11, 12].

В процессе разделения ступеней перспективных многоразовых РН возникает вопрос об использовании СР с учетом их многократности. При этом основные критерии эффективности – предотвращение образования осколков после разделения, снижение воздействия ударных нагрузок при разделении, а также повышение надежности срабатывания СР, что является актуальной и практически важной проблемой [13, 14].

Идея создания новых конструктивных схем для таких устройств с учетом их многоразового применения основывается на методах, используемых при сборке и разборке соединения без нарушения целостности силовой конструкции, к которым относятся пружинные толкатели и пневматолкатели, замковые устройства (ЗУ) цапгового, рычажного, шарикового и других типов [3, 4].

Среди вышеперечисленных типов СР можно выделить ЗУ шарикового типа, которое обладает рядом преимуществ, выделяющих их на фоне устройств, основанных на иных принципах [15]. Поэтому исследование концептуальных конструктивных схем, выбор технических параметров и анализ особенностей применения устройств шарикового типа представляет практический интерес при адаптации существующих и создании новых СР.

ЗУ шарикового типа должны удовлетворять следующим основным требованиям: надежность удержания рабочей нагрузки; синхронность срабатывания; быстродействие; минимизация энергии, затрачиваемой на срабатывание; отсутствие осколков после разделения и др. [16, 17]. Для принятия решения о применении ЗУ шарикового типа необходимо рассмотреть факторы, влияющие на эффективность их применения.

На рис. 1 показана конструктивная схема ЗУ шарикового типа, входящего в состав СР.

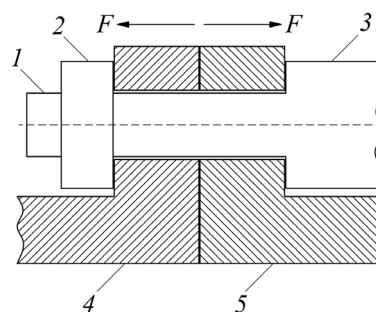


Рис. 1. Схема установки замкового устройства шарикового типа в составе системы разделения: 1 – шток; 2 – элемент натяжения; 3 – корпус замка; 4 – блок разделения № 1; 5 – блок разделения № 2

Ниже представлены принцип работы и последовательность операций ЗУ, обеспечивающих безотказную работу всего механизма разделения шарикового типа. Перед установкой ЗУ шток находится в корпусе замка в состоянии, зафиксированном с помощью разрывной шпильки. Корпус замка со штоком закрепляется на шпангоуте блока № 2. При сопряжении фланцевых поверхностей шпангоутов блоков № 1 и № 2 шток ЗУ входит в отверстие шпангоута блока № 2. С помощью элемента натяжения фланцевые поверхности шпангоутов стягиваются с требуемой силой F . При этом условия работы ЗУ в составе СР предполагают, что замок подвергается воздействию только осевых растягивающих нагрузок, поскольку в конструкции стыка имеются элементы, воспринимающие перерезывающие и крутящие силы, а размещение замков на периферии соединяемых блоков позволяет воспринимать изгибающие моменты, действующие на соединение блоков, как совокупность осевых нагрузок для самих замков. Сжимающие нагрузки воспринимаются фланцевыми поверхностями стыковочных шпангоутов, поэтому замки работают только с растягивающими нагрузками. Такая схема предполагает, что ЗУ должны устанавливаться с преднапрягом, чтобы избежать раскрытия стыка. Это обеспечивается специальным элементом натяжения на этапе установки ЗУ с контролем осевой растягивающей силы [18].

При подаче команды на расстыковку от БСУ внутренняя конструкция корпуса замка освобождает шток, что приводит к разрыву механической связи между блоками № 1 и № 2. Корпус замка остается на блоке № 1, шток и элемент натяжения остаются на блоке № 2. Корпус замка на блоке № 1 зафиксирован на шпангоуте, и не требуется защита от осколков. Шток и элемент натяжения после разделения не имеют жесткой фиксации на шпангоуте блока № 2, и требуется дополнительная защита от осколков.

Для удержания рабочей нагрузки геометрия, материал и изготовление элементов конструкции ЗУ шарикового типа должны соответствовать статической постановке, с учетом коэффициента динамичности и запасов прочности [19]. С точки зрения надежности удержания рабочей нагрузки непосредственно в месте разрыва связи представляет интерес диаграмма растяжения, показывающая зависимость между приложенной силой и относительным растяжением (рис. 2).

На участке № 1 все изменения, происходящие в конструкции, обратимы, материалы работают в зоне упругих деформаций, геометрия изделия не нарушается. Зависимость удлинения изделия ε от приложенной силы F можно записать в виде

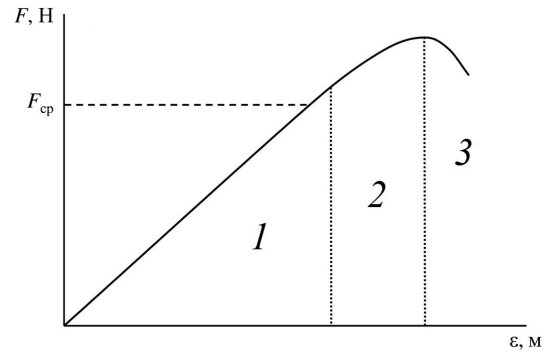


Рис. 2. Диаграмма растяжения замкового устройства шарикового типа с характерными участками: 1 – упругий участок; 2 – пластический участок; 3 – участок разрушения; F_{cp} – сила среза шпильки

$$\varepsilon = \frac{F}{k}, \tag{1}$$

где k – коэффициент жесткости, Н/м.

На участке № 2 возникают пластические деформации и, соответственно, нарушается геометрия конструкции. Работа на этом участке может привести к непредсказуемым последствиям.

На участке № 3 конструкция полностью разрушается.

Для открытия замка необходимо выполнение двух условий: срез шпильки и перемещение толкателя в положение, в котором шарики обретают радиальную подвижность. При наличии соответствующего давления в газовой магистрали оба эти условия выполняются. Несрезанная шпилька не позволяет толкателю переместиться в положение, в котором шарики обретают радиальную подвижность. Таким образом, несрезанная шпилька – необходимое и достаточное условие для сохранения замка в закрытом положении. В случае разрушения шпильки толкатель может свободно двигаться в сторону открытия и замок может открыться. Однако введение пружины малой жесткости, прижимающей толкатель к поршню, позволит обеспечить нахождение замка в закрытом состоянии даже при нарушении целостности срезной шпильки.

В общем случае, сила среза шпильки F_{cp} должна действовать на участке № 1. На данном участке система обладает запасом надежности, при этом замок открывается только при передаче извне достаточной энергии.

Общий вид и конструктивная схема ЗУ шарикового типа представлены на рис. 3 и 4.

С помощью штуцера и прижимной гайки тело ЗУ подключается к общему распределительному газовому коллектору. В отсутствие давления в коллекторе на толкатель не действуют силы и он находится в неподвижном состоянии, удерживаемый

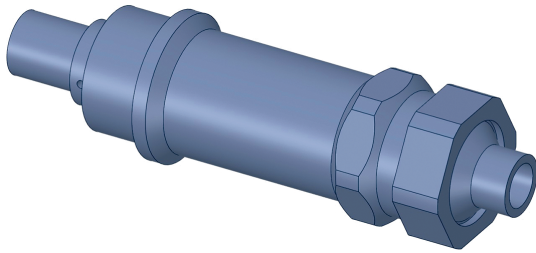


Рис. 3. Общий вид замкового устройства шарикового типа

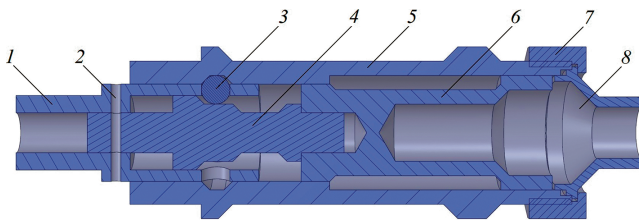


Рис. 4. Конструктивная схема замкового устройства шарикового типа: 1 – шток; 2 – срезная шпилька; 3 – шарик; 4 – толкатель; 5 – корпус; 6 – поршень; 7 – прижимная гайка; 8 – штуцер

срезаемой шпилькой. Шарики замка находятся в положении, при котором шток через них передает усилие на корпус ЗУ, и таким образом растягивающее усилие передается с шпангоута блока № 1 на шпангоут блока № 2. Замок закрыт и удерживает блоки РН в состыкованном состоянии.

При избыточном давлении в газовой магистрали разница давлений во внутренней полости, сформированной корпусом и поршнем, и во внешней среде давит на поршень. Сила давления пропорциональна площади поршня и давлению в газовой магистрали. Поршень давит на толкатель, но он остается неподвижным, поскольку удерживается срезной шпилькой. По достижении силы, достаточной для среза шпильки, она срезается, толкатель досылается поршнем вперед и принимает положение, в котором возможно перемещение шариков замка в осевом направлении. Шарики перемещаются, и механическая связь «шток – корпус» разрывается. Шток выходит из корпуса и остается в составе отделяемого блока.

Время срабатывания ЗУ шарикового типа зависит от количества ЗУ в системе, давления в системе, гидравлического сопротивления, массы поршня и толкателя, от силы среза шпильки.

В первом приближении, с учетом условий функционирования, можно рассматривать рост давления в поршневой полости как линейный. Вероятность срабатывания ЗУ при данном давлении можно описать по нормальному закону [19]:

$$\varphi_p(p) = -\frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}}, \quad (2)$$

где $\varphi_p(p)$ – вероятность срабатывания при давлении p ; μ_p – математическое ожидание давления срабатывания; σ_p – среднеквадратичное отклонение давления срабатывания.

Объединяя на рис. 5 вероятность срабатывания ЗУ и линейную зависимость роста давления от времени, можно видеть, что плотность вероятности срабатывания ЗУ во времени зависит от скорости роста давления. При этом необходимо получить высокую надежность срабатывания, либо повысив скорость роста давления на всем временном интервале, либо обеспечив двуступенчатую схему, при которой давление относительно медленно повышается во всей системе до уровня ниже уровня срабатывания, а затем быстро увеличивается до верхней границы, и тогда замок срабатывает.

На рис. 5 синяя линия показывает равномерное повышение давления, а зеленая – повышение давления в два этапа. Сначала давление повышается до уровня ниже минимально возможного давления срабатывания, а потом до уровня максимально возможного давления срабатывания, что сужает временной диапазон, в котором срабатывают все ЗУ.

На основе закона изменения давления от времени определим вероятность срабатывания системы в заданный момент времени [19]:

$$\varphi_t(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (3)$$

где $\varphi_t(t)$ – вероятность срабатывания в момент времени t ; μ_t – математическое ожидание времени

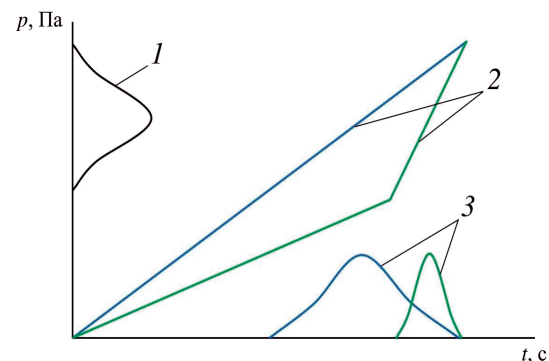


Рис. 5. Время срабатывания замкового устройства шарикового типа: 1 – плотность вероятности срабатывания от давления; 2 – изменение давления во времени; 3 – зависимость плотности вероятности срабатывания от времени

срабатывания, $\mu_t = \mu_p(p(t))$; σ_t – среднее квадратичное отклонение времени срабатывания, $\sigma_t = \sigma_p(p(t))$, которое определяется по результатам экспериментально-математического моделирования. Далее в БСУ вносятся соответствующие поправки [19, 20].

Время срабатывания ЗУ должно укладываться в допуск, который определяется СР на РН, например для пироклапана он составляет $\sim 1,0 \cdot 10^{-2}$ с [21]. В системе ЗУ шарикового типа, активируемой газом, поступающим из общей магистрали, в месте подключения замка к магистрали происходит задержка. При разнице длин магистралей порядка 0,3 м и скорости распространения давления, равной скорости звука $3,0 \cdot 10^2$ м/с, задержка составит $1,0 \cdot 10^{-3}$ с [22]. Следовательно, необходимы компенсирующие мероприятия, обеспечивающие синхронность срабатывания ЗУ, например уравнивание длин трубопроводов до всех ЗУ. Однако в результате таких мероприятий увеличиваются массогаранитные характеристики, а также усложняется конструкция системы.

Срабатывание одного из ЗУ при срезании шпильки приводит к малонагруженному перемещению поршня сработавшего ЗУ. Это увеличивает объем газовой полости, общей для всех ЗУ, что снижает скорость роста давления в системе и, таким образом, задерживает срабатывание других клапанов.

На рис. 6 представлено влияние отрицательной обратной связи от срабатывания ЗУ шарикового типа на общее время срабатывания.

Из рис. 6 видно, что, в отличие от идеального времени срабатывания всей системы $t_{и}$, реальное время увеличивается за счет отрицательной обратной связи. Для синхронности срабатывания всех ЗУ, напротив, требуется положительная обратная

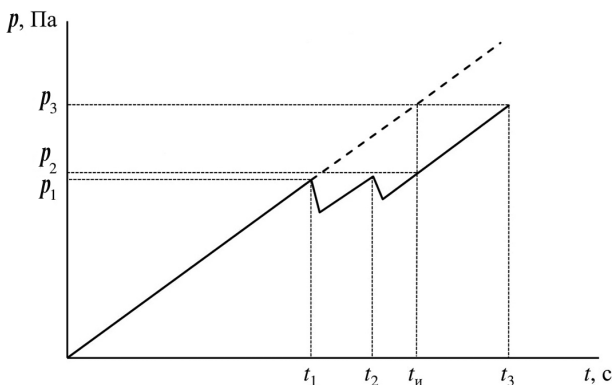


Рис. 6. Влияние отрицательной обратной связи от срабатывания замковых устройств шарикового типа на общее время срабатывания:
 t_1 – первого замка при давлении p_1 ;
 t_2 – второго замка при давлении p_2 ;
 $t_{и}$ – идеального для всей системы;
 t_3 – третьего замка при давлении p_3

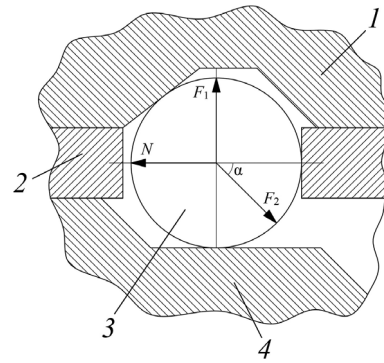


Рис. 7. Система сил, действующая на шарик замкового устройства шарикового типа: 1 – корпус; 2 – шток; 3 – шарик; 4 – толкатель; F_1 и F_2 – силы, действующие на шарик, N ; N – нормальная сила, N ; α – угол конусности, рад

связь, когда срабатывание одного из ЗУ приводит к росту давления в системе, вызывая таким образом цепную реакцию и сокращая разброс времени срабатывания всех ЗУ.

В рассматриваемой конструкции на шарик ЗУ действует система сил, представленная на рис. 7.

В статическом состоянии силы F_1 и F_2 , действующие на шарик, уравновешены, что позволяет определить нормальную силу в зоне контакта N , где $F_1 = F_2 \sin(\alpha)$; $N = F_2 \cos(\alpha)$ [23]. При перемещении толкателя вращение шарика происходит с трением, причем относительно толкателя это трение качения, а относительно корпуса и штока – трение скольжения.

Следовательно, давление газа, площадь поршня и его ход должны быть достаточны для преодоления данных сил и выполнения необходимой работы ЗУ.

Размер, химический состав материала и количество шариков, входящих в конструкцию ЗУ, можно определить на основе аналитических зависимостей, описывающих максимальное напряжение, возникающее в зоне контакта шарика с плоскостью [24]:

$$\sigma_{\max} = 0,338 \cdot \sqrt[3]{4N \frac{E_1^2 E_2^2 (R_1 + R_2)}{(E_1 + E_2) R_1^2 R_2^2}}, \quad (4)$$

где E_1, E_2 – модули упругости материалов шарика и плоскости соответственно, Па; R_1, R_2 – радиусы кривизны шарика и плоскости соответственно, м.

Для оценки контактной прочности элементов конструкции (в частности, шариков) ЗУ шарикового типа было проведено экспериментально-математическое моделирование с помощью специального программно-алгоритмического обеспечения, которое позволило получить данные о контактных

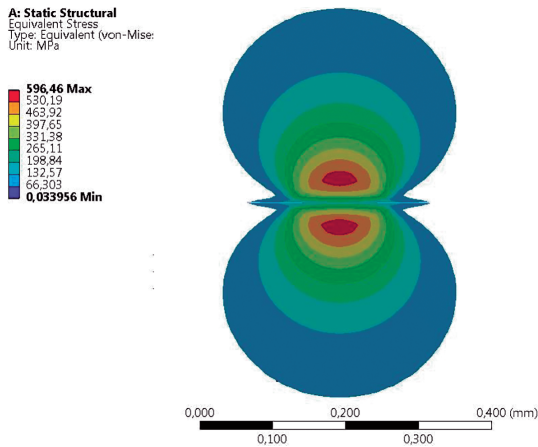


Рис. 8. Распределение напряжений в зоне контакта шарика

деформациях с учетом силы трения и износа в различных условиях эксплуатации.

На рис. 8 представлено распределение напряжений в околоконтактной зоне для шарика диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м при нагружении силой 10,0 Н.

Из рис. 8 видно, что контактные напряжения неравномерно распределены по контактной поверхности и образуют плоский эллипсоид напряжений с осями, параллельными главным напряжениям. На глубине, равной примерно половине радиуса площадки контакта, возникает максимальное напряжение, а по мере удаления от этой глубины и приближения к зоне контакта напряжения постепенно уменьшаются. Следует отметить, что при приложении к зоне контакта больших сил шарик будет подвергаться большим напряжениям и, следовательно, иметь меньшую прочность и долговечность, в зависимости от материала, из которого он изготовлен [25, 26].

На рис. 9 представлены результаты экспериментально-математического моделирования для шарика диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м при нагружении

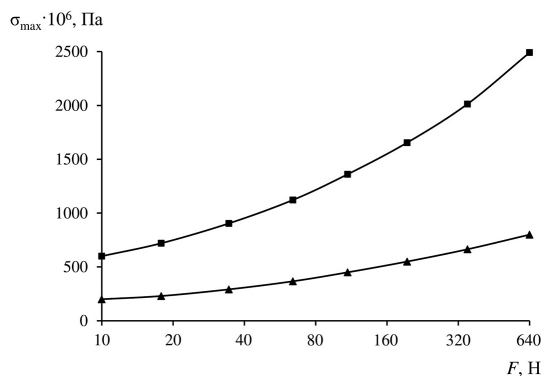


Рис. 9. Зависимость максимальных напряжений от силы: ■ — на глубине, равной половине радиуса площадки контакта; ▲ — в зоне контакта

различными силами.

Из рис. 9 видно, что для шарика, изготовленного из стали ШХ15 согласно ГОСТ 801-2022 с термической обработкой (предел прочности – $1,67 \cdot 10^9$ Па) [27], нагрузка на единичную контактную поверхность может составлять $6,4 \cdot 10^2$ Н. Следовательно, узел разделения, включающий шесть таких контактных поверхностей, может нести нагрузку $3,9 \cdot 10^3$ Н. Варьируя такие параметры, как диаметр шариков, их количество и материал, можно определить максимальную нагрузку. К примеру, для нагрузки $2,0 \cdot 10^4$ Н потребуется шесть таких узлов или, с учетом запаса прочности в два порядка, 12 узлов. Анализ результатов экспериментально-математического моделирования позволяет определить количество, материал и диаметр используемых шариков в зависимости от нагрузки в узлах блоков разделения РН.

Выводы

В ходе аналитических исследований замкового устройства шарикового типа было установлено, что скорость роста давления в поршневой полости и сила среза шпильки существенно влияют на вероятность безотказного срабатывания. На основании результатов исследования можно определить рациональные массогабаритные и конструктивные характеристики системы в целом.

Экспериментально-математическое моделирование, проведенное для оценки контактной прочности элементов конструкции замкового устройства шарикового типа, показало, что использование шариков из стали ШХ15 с высокими прочностными характеристиками, подвергнутых термической обработке, а также применение специальных элементов натяжения для равномерного распределения силовых нагрузок позволяют значительно снизить максимальные значения напряжений и добиться высокой степени синхронности срабатывания. Таким образом, разработанное устройство может быть использовано в составе систем разделения перспективных многоразовых ракет-носителей.

Список источников

1. Ermakov V.Yu., Tufan A., Biryukova M.V. et al. Fundamentals of spacecraft dynamics. – Moscow: Izd-vo MAI, 2024. – 180 p.
2. Охочинский М.Н. Системы разделения в ракетной технике. Ч. 1. Системы разделения ступеней составных ракет. – СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2009. – 61 с.
3. Куренков В.И., Юмашев Л.П. Выбор основных проектных характеристик и конструктивного облика ракет-носителей: Учеб. пособие / Под ред. чл.-корр РАН Д.И. Козлова. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005. – 240 с.

4. Колесников К.С., Кокушкин В.В., Борзых С.В. и др. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 376 с.
5. Ефанов В.В. Проектирование устройств и систем разделения космических аппаратов // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Т. 1. — 2-е изд., перераб. — М.: Изд-во МАИ, 2012. С. 336–397.
6. Hwang D.-H., Han J.-H., Lee J. et al. A mathematical model for the separation behavior of a split type low-shock separation bolt // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 164. No. 1, pp. 393–406. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.07.035
7. Xiong S., Wang J., Li Y. et al. Design and research of a low-noise pyrotechnic separation device // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2022. Vol. 41. No. 2, pp. 611–624. DOI: 10.1177/14613484211051872
8. Efanov V.V., Gorovtsov V.V., Kotomin A.A. et al. Pyro devices for the “ExoMars-2018” space complex separation // *Solar System Research*. 2015. Vol. 49. No. 7, pp. 569–572. DOI: 10.1134/S0038094615070059
9. Kotomin A.A., Dushenok S.A., Demyanenko D.B. et al. A new generation of spacecraft pyroautomatic systems as a result of a successful cooperation // *Solar System Research*. 2017. Vol. 50. No. 7, pp. 546–551. DOI: 10.1134/S0038094616070133
10. Yue H., Yang Y., Lu Y. et al. Research progress of space non-pyrotechnic low shock connection and separation technology (SNLT): A review // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 35. No. 11. pp. 113–154. DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.001.
11. Kuzin E.N., Zagarskih V.I., Gasheev D.V. et al. Engineering methodology for assessment of spacecraft structure shock load levels during pyromechanical separation // *Solar System Research*. 2018. Vol. 52. No. 7. pp. 662–665. DOI: 10.1134/S0038094618070146.
12. Xiong S., Li Y., Ye Y. et al. Quantitatively decoupling the impact of preload and internal mechanism motion on pyrotechnic separation shock // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2021. Vol. 22. No. 1, pp. 1106–1117. DOI: 10.1007/s42405-021-00354-2
13. Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Методы мониторинга надежности технических систем // *Вестник Московского авиационного института*. 2013. Т. 20. № 4. С. 72–80. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=46084&ysclid=m2cd4uuqnp562099231>
14. Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Методы повышения эффективности контроля агрегатов изделий ракетно-космической техники // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 4. С. 46–52. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=63504>
15. Lee J., Han J.-H. Separation and release devices for aeronautical and astronautical systems: A review // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2024. DOI: 10.1007/s42405-024-00802-9
16. ГОСТ 14.201-83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 9 с.
17. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 79 с.
18. Амосов А.П., Воронин С.В., Лобода П.С. и др. Определение влияния поверхностного натяжения на механические свойства алюминиевого сплава методом компьютерного моделирования // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 2. С. 214–222. DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222
19. Золотов А.А., Родченко В.В., Гусев Е.В. Прикладные задачи обеспечения надежности при разработке ракетно-космических систем. — М.: Изд-во МАИ, 2023. — 160 с.
20. Золотов А.А., Оделевский В.К., Родченко В.В. и др. Прикладные методы и алгоритмы обеспечения надежности и безопасности технических систем на этапе их разработки и эксплуатации. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 349 с.
21. Демьяненко Д.Б., Страхов И.Г., Дудырев А.С. и др. Пиротехнические временные устройства для объектов космической техники // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2012. № 3 (14). С. 35–39.
22. Singaravelu J., Jeyakumar D., Rao B.N. Reliability and safety assessments of the satellite separation process of a typical launch vehicle // *The Journal of Defense Modeling and Simulation Applications Methodology Technology*. 2012. Vol. 9. No. 4, pp. 369–382. DOI: 10.1177/1548512911401939
23. Antipov Y.A., Mkhitaryan S.M. Hertzian and adhesive plane models of contact of two inhomogeneous elastic bodies // *European Journal of Applied Mathematics*. 2022. Vol. 34. No. 4, pp. 667–700. DOI: 10.1017/S0956792522000237
24. Yaghoubi M., Tavakoli H. Hertzian contact stress // *Mechanical design of machine elements by graphical methods*. Cham, Switzerland, Springer, 2022. 416 p.
25. Дегтярев С.А., Кутаков М.Н., Леонтьев М.К. и др. Учет контактных взаимодействий при моделировании жесткостных свойств роликовых подшипников // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 2. С. 137–141. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=57616>
26. Sugunesh A.P., Mertens A.J. A comprehensive study on Hertzian contact stress behaviour of engineering thermoplastic gears using 3D finite element analysis // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023. Vol. 228. No. 2. pp. 586–597. DOI: 10.1177/09544062231167015
27. ГОСТ 801-2022. Прокат из подшипниковой стали. Технические условия. — М.: Российский институт стандартизации, 2023. — 43 с.

References

- Ermakov VYu, Tufan A, Biryukova MV et al. *Fundamentals of spacecraft dynamics*. Moscow: MAI; 2024. 180 p.
- Okhochinskiy MN. *Sistemy razdeleniya v raketnoi tekhnike. Ch. 1. Sistemy razdeleniya stupenei sostavnykh raket* (Separation systems in rocket technology. Part 1. Separation systems of composite rocket stages). Saint Petersburg: BGTU "Voenmekh"; 2009. 61 p. (In Russ.).
- Kurenkov VI, Yumashev LP. *Vybor osnovnykh proektnykh kharakteristik i konstruktivnogo oblika raket-nositelei* (Selection of the main design characteristics and design appearance of launch vehicles). Samara: Samara University; 2005. 240 p. (In Russ.).
- Kolesnikov KS, Kokushkin VV, Borzykh SV et al. *Raschet i projektirovanie sistem razdeleniya stupenei raket* (Calculation and design of rocket stage separation systems). Moscow: BMSTU; 2006. 376 p. (In Russ.).
- Efanov VV. *Projektirovanie ustroystv i sistem razdeleniya kosmicheskikh apparatov*. In: *Projektirovanie avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy*. 2nd ed. Moscow: MAI; 2013. Vol. 1. p. 336–397. (In Russ.).
- Hwang DH, Han JH, Lee J et al. A mathematical model for the separation behavior of a split type low-shock separation bolt. *Acta Astronautica*. 2019;164(1):393–406. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.07.035
- Xiong S, Wang J, Li Y et al. Design and research of a low-noise pyrotechnic separation device. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2022;41(2):611–624. DOI: 10.1177/14613484211051872
- Efanov VV, Gorovtsov VV, Kotomin AA et al. Pyro devices for the "ExoMars-2018" space complex separation. *Solar System Research*. 2015;49(7):569–572. DOI: 10.1134/S0038094615070059
- Kotomin AA, Dushenok SA, Demyanenko DB et al. A new generation of spacecraft pyroautomatic systems as a result of a successful cooperation. *Solar System Research*. 2017;50(7):546–551. DOI: 10.1134/S0038094616070133
- Yue H, Yang Y, Lu Y et al. Research progress of space non-pyrotechnic low shock connection and separation technology (SNLT): A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022;35(11):113–154. DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.001.
- Kuzin EN, Zagarskiy VI, Gasheev DV et al. Engineering methodology for assessment of spacecraft structure shock load levels during pyromechanical separation. *Solar System Research*. 2018;52(7):662–665. DOI: 10.1134/S0038094618070146.
- Xiong S, Li Y, Ye Y et al. Quantitatively decoupling the impact of preload and internal mechanism motion on pyrotechnic separation shock. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2021;22(1):1106–1117. DOI: 10.1007/s42405-021-00354-2
- Zolotov AA, Nurullaev ED. The monitoring methods for technical systems reliability. *Aerospace MAI Journal*. 2013;20(4):72–80. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=46084&ysclid=m2cd4uuqnp562099231>
- Zolotov AA, Nurullaev ED. Efficiency upgrading techniques for assembly products of space-rocket equipment. *Aerospace MAI Journal*. 2015;22(4):46–52. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=63504>
- Lee J, Han JH. Separation and release devices for aeronautical and astronautical systems: A review. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2024. DOI: 10.1007/s42405-024-00802-9
- Obespechenie tekhnologichnosti konstruksii izdelii. Obshchie trebovaniya. GOST 14.201-83* (Provision of technological efficiency of design production. General requirements. State Standard 14.201-83). Moscow: Standartinform; 2009. 9 p. (In Russ.).
- Nadezhnost' v tekhnike. Metody kontrolya pokazatelei nadezhnosti i plany kontrol'nykh ispytaniy na nadezhnost'*. GOST 27.410-87 (Industrial product dependability. Inspection methods of reliability indices and plans of check tests on reliability. State Standard 27.410-87). Moscow: Standarty; 2002. 79 p. (In Russ.).
- Amosov AP, Voronin SV, Loboda PS et al. Determining surface tension effect on aluminum alloy mechanical properties by computer simulation technique. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(2):214–222. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222.
- Zolotov AA, Rodchenko VV, Gusev EV. *Prikladnye zadachi obespecheniya nadezhnosti pri razrabotke raketno-kosmicheskikh sistem* (Applied tasks of ensuring reliability in the development of rocket and space systems). Moscow: MAI; 2023. 160 p. (In Russ.).
- Zolotov AA, Odelevskii VK, Rodchenko VV et al. *Prikladnye metody i algoritmy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti tekhnicheskikh sistem na etape ikh razrabotki i ekspluatatsii* (Applied methods and algorithms for ensuring the reliability and safety of technical systems at the stage of their development and operation). Moscow: MAI; 2013. 349 p. (In Russ.).
- Dem'yanenko DB, Strakhov IG, Dudyrev AS et al. Pyrotechnic timing devices for objects of space technics. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2012;(3):35–39. (In Russ.).
- Singaravelu J, Jeyakumar D, Rao BN. Reliability and safety assessments of the satellite separation process of a typical launch vehicle. *The Journal of Defense Modeling and Simulation Applications Methodology Technology*. 2012;9(4):369–382. DOI: 10.1177/1548512911401939
- Antipov YA, Mkhitarian SM. Hertzian and adhesive plane models of contact of two inhomogeneous elastic bodies. *European Journal of Applied Mathematics*. 2022;34(4):667–700. DOI: 10.1017/S0956792522000237

24. Yaghoubi M, Tavakoli H. Hertzian contact stress. In: *Mechanical design of machine elements by graphical methods*. Cham, Switzerland: Springer; 2022. 416 p.
25. Degtiarev SA, Kutakov MN, Leontiev MK. et al. Consideration of contact interactions when modelling stiffness characteristics of roll bearings. *Aerospace MAI Journal*. 2015;22(2):137–141. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=57616>
26. Sugunesh AP, Mertens AJ. A comprehensive study on Hertzian contact stress behaviour of engineering thermoplastic gears using 3D finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023;228(2):586–597. DOI: 10.1177/09544062231167015
27. *Prokat iz podshipnikovoi stali. Tekhnicheskie usloviya. GOST 801-2022* (Rolled products from bearing steel. Specifications. State Standard 801-2022). Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii; 2023. 43 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; одобрена после рецензирования 25.10.2024; принята к публикации 29.10.2024.
The article was submitted on 16.10.2024; approved after reviewing on 25.10.2024; accepted for publication on 29.10.2024.