

Моделирование процесса создания высокоскоростных удлиненных элементов с изменяемой формой

© П.В. Круглов, В.И. Колпаков, И.А. Болотина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для наземного моделирования проникания частиц и элементов в корпус космического аппарата предложено использовать заряды, формирующие высокоскоростные удлиненные элементы с изменяемой формой. В процессе функционирования такого заряда взрывчатое вещество способно разметать металлическую облицовку на расстоянии нескольких сотен диаметров заряда. Металлическая сегментная облицовка деформируется в процессе метания и принимает форму удлиненного элемента. В расчетах применяли стальные облицовки с дегрессивным и прогрессивным профилем, наружная и внутренняя поверхности которых образованы сферическими поверхностями, а также сочетанием сферических и конических поверхностей. Представлены результаты численного анализа, определяющего влияние геометрических и физико-механических параметров сегментных кумулятивных облицовок, на эффективность действия зарядов, формирующих высокоскоростные удлиненные элементы. Эффективность зарядов определялась по характеристикам формируемого элемента — удлинению, степени наполненности и диаметру хвостового стабилизатора (юбки). Установлены зависимости, описывающие влияние на удлинение элемента и диаметр юбки динамического предела текучести материала облицовки и радиуса перехода сферической поверхности в коническую поверхность. Показано возможное противоречивое влияние изменения радиуса перехода сферической поверхности облицовки в коническую поверхность на параметры аэродинамической устойчивости высокоскоростного удлиненного элемента.

Ключевые слова: высокоскоростные удлиненные элементы, космический мусор, металлическая облицовка, противометеороидная защита, численное моделирование

Введение. Мониторинг состояния околоземного космического пространства показывает, что существенно возрастают количество техногенных осколков космического мусора и опасности столкновения высокоскоростных осколков естественного и искусственного происхождения с орбитальными космическими аппаратами (КА). Поиск решения этой проблемы ведется в нескольких направлениях [1–5].

Одним из направлений является повышение прочности КА путем оснащения их защитными экранами, созданными в виде дискретных экранов КА на основе компактных элементов из механохимических активных (реакционных) композиционных материалов. Использование таких материалов позволит разрушать проникающую частицу за счет выделения большого количества энергии при ее контакте с

защитным экраном и предотвращать пробитие основного материала оболочки КА.

Другим направлением является моделирование на земле процессов пробития КА частицами и элементами различной массы со скоростями 2...15 км/с с целью поиска таких параметров противометеороидной защиты, которые позволят обеспечить требуемый уровень безопасности КА [1–4]. Для разгона частиц до таких скоростей применяются различные способы. В частности, в работе [2] предлагается использовать электромагнитную рельсовую пушку, обеспечивающую разгон частиц массой 10 мг до скорости 5,5 км/с. При моделировании процессов пробития преград традиционным способом является воздействие кумулятивных зарядов. Анализируются результаты расчетов и экспериментов по прониканию в преграду вытянутого ударника, движущегося со скоростью 7,4 км/с [4].

В приведенных выше исследованиях рассматриваются случаи высокоскоростного удара частиц космического мусора о преграду. Вместе с тем установлено, что серьезную проблему для КА представляют метеороиды, летящие со скоростью 2...3 км/с [1–4], и поэтому заслуживают внимания результаты исследований столкновения частиц и элементов, имеющих эти скорости, с защитными экранами космических аппаратов. Для моделирования такого элемента предлагается использование зарядов, образующих высокоскоростные удлиненные элементы, которые изменяют свою геометрию в процессе полета [5–26].

Высокоскоростные удлиненные элементы (ВУЭ) образуются путем высокоскоростного деформирования металлических облицовок, изготовленных, как правило, из пластичных металлов, посредством взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ). Поскольку моделирование функционирования такого заряда возможно в условиях движения ВУЭ в воздухе, необходимо обеспечить аэродинамическую устойчивость этого элемента. Аэродинамическая устойчивость ВУЭ обеспечивается при расположении центра масс элемента впереди его центра давления. Это требование обычно удовлетворяется за счет расширения хвостовой части формируемого взрывом элемента, получившей название юбки.

Исследования в области совершенствования параметров ВУЭ проводились многими специалистами [5–30]. В работах [13, 14] установлено влияние таких параметров заряда, как материал облицовки и длина заряда на характеристики образующегося элемента. В качестве материалов облицовок современных зарядов используют пластичные марки стали, медь, а также сплавы тантала [5–31]. Для исследования возможных направлений совершенствования зарядов применяют методы математического моделирования [5–26]. Повышение эффективности действия зарядов обеспечивается:

- улучшением параметров состава взрывчатых веществ заряда, оптимизированием формы заряда и облицовки [13, 14, 23, 24];
- исследованием компактных и удлиненных форм элементов [21–26];
- проведением анализа стадии проникания элемента в преграду [27, 28];
- совершенствованием технологии изготовления кумулятивной облицовки [29–31] и сборки заряда [32–35].

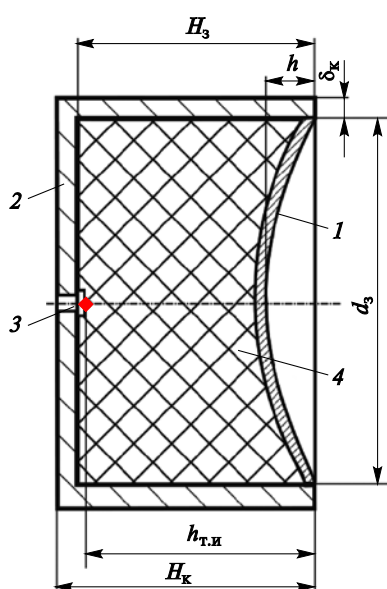


Рис. 1. Схема заряда:

H_3 — высота заряда ВВ; h — прогиб облицовки; δ_k — толщина корпуса, мм; d_3 — диаметр взрывчатого заряда, мм; H_k — высота корпуса заряда, мм; $h_{т.и}$ — расстояние от торца заряда до точки инициирования

В настоящей статье представлены результаты исследования, выполненного с использованием численных методов механики сплошных сред, в ходе которого определялся характер влияния конструктивных параметров облицовки заряда на форму и устойчивость ВУЭ.

Целью данной статьи является повышение эффективности зарядов, формирующих высокоскоростные удлиненные элементы.

Заряд (см. рис. 1) состоит из металлической кумулятивной облицовки (КО) 1, заряда ВВ 2, корпуса 3 и детонатора 4. Подобные заряды при взрыве в зависимости от конструктивных параметров формируют высокоскоростной компактный либо удлиненный элемент (рис. 2).

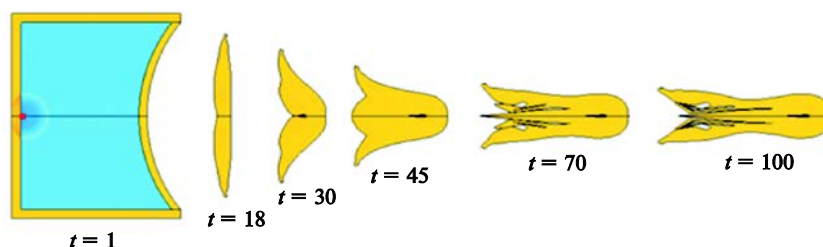


Рис. 2. Процесс формирования высокоскоростного удлиненного элемента взрывом заряда в разное время t , мкс

По сравнению с компактными элементами той же массы преимуществом удлиненной формы элемента является его большая

пробивная способность. Эффект достигается за счет большей длины и меньшей потери скорости при движении на большие дистанции. Другой немаловажной характеристикой ВУЭ является его наполненность. Очевидно, что чем выше наполненность, тем больше его пробивное действие [5–9]. Для защиты КА данное обстоятельство позволяет использовать в натурных экспериментах заряды меньшей массы и более низкой стоимости по сравнению с зарядами, формирующими компактные элементы, для моделирования одинакового кинетического воздействия.

Методика расчета. Для определения параметров зарядов, обеспечивающих получение элементов большего удлинения (т. е. большей эффективности), был проведен масштабный вычислительный эксперимент, основанный на численном решении задач механики сплошных сред. Варианты геометрии стальных сегментных кумулятивных облицовок (КО) показаны на рис. 3.

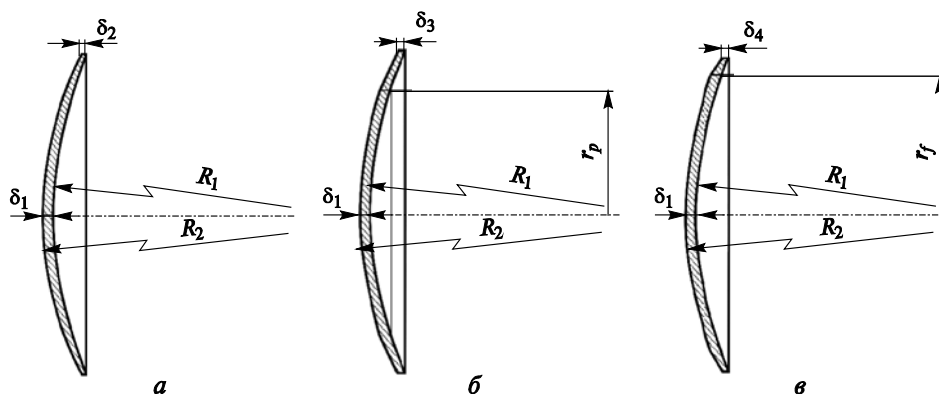


Рис. 3. Варианты форм облицовок:

a — дегрессивная; *б* — комбинированная со сфероконическими поверхностями; *в* — комбинированная с широкой конической фаской; δ_1 — толщина центральной части облицовки, мм; δ_2 , δ_3 , δ_4 — толщина периферийной части облицовки, мм; R_1 — радиус внутренней сферической поверхности; R_2 — радиус наружной сферической поверхности

Авторы настоящей статьи рассматривали следующие варианты форм облицовки:

- дегрессивная — толщина профиля облицовки в радиальном направлении от центра к периферии уменьшается (рис. 3, *a*) [13, 14];
- комбинированная — в двух вариациях:
 - со сфероконическими поверхностями (внутренняя и наружная; рис. 3, *б*);
 - с широкой конической фаской (наружная поверхность коническая, рис. 3, *в*).

Необходимо отметить, что у КО со сфероконическими поверхностями (см. рис. 3, *б*) центральная часть образована сферическими поверхностями, а периферийная — двумя коническими поверхностями.

Параметрическая модель такой облицовки характеризуется радиусом перехода сферической части в коническую r_p , а также толщинами облицовки в центральной части δ_1 и на периферии δ_3 . Форма облицовки с развитой фаской на наружной поверхности (см. рис. 3, в) также характеризуется толщинами КО в центральной части δ_1 и на периферии δ_4 и радиусом перехода наружной сферической поверхности в коническую фаску r_f .

В качестве модельных зарядов были использованы изделия с двумя вариантами диаметра заряда взрывчатого вещества (или внутреннего диаметра корпуса). Для $d_3 = 125$ мм применялись следующие параметры:

- высота корпуса заряда $H_3 = 100$ мм;
- толщина корпуса $\delta_k = 6$ мм;
- прогиб облицовки $h = 20,88$ мм;
- толщина облицовки центральной части $\delta_1 = 5$ мм;
- толщина облицовки периферийной части $\delta_2 = 4,5 \dots 6,2$ мм.

Для того чтобы задать значения параметров заряда с диаметром заряда взрывчатого вещества $d_3 = 62$ мм, был принят масштабный коэффициент $62/125 \approx 0,5$.

В качестве конструкционных материалов рассматривались:

- для облицовки — низкоуглеродистые стали,
- корпуса — сталь 45Х;
- ВВ — состав на основе тротила.

Для зарядов обоих типоразмеров применялось одноточечное инициирование.

Результаты расчетов. При моделировании функционирования зарядов с металлической облицовкой были получены ВУЭ различных форм. Под действием давления фронта детонационной волны материал облицовки переходит в пластичное состояние и на отрезке времени от 10 до 130 мкс облицовка деформируется. Как показали расчеты, форма элементов после 130...150 мкс полета практически не изменялась, их материал возвращался в упругое состояние и элементы приобретали форму, с которой они полетят к преграде. Результаты расчетов моделей с комбинированными сфероконическими облицовками (см. рис. 3, а) представлены на рис. 4.

Динамический предел текучести Y принимался равным 0,65 ГПа. Использование комбинированных сфероконических облицовок позволяет формировать ВУЭ с удлинением (отношением длины к диаметру элемента) более 3 единиц, имеющие развитую стабилизирующую юбку различной конфигурации в хвостовой части (см. рис. 4, б). Наполненность таких элементов достаточно высокая, что положительно сказывается на пробивной способности заряда. Кроме того, на рис. 4, б видно, что диаметр юбки в хвостовой части существенно

больше, чем у элементов, образованных из облицовок дегрессивной толщины (см. рис. 2). Данные расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке.

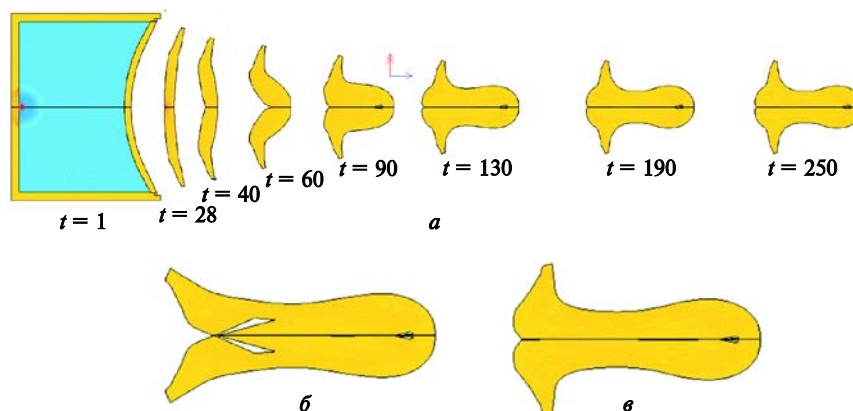


Рис. 4. Динамика формирования ВУЭ из сфероконических облицовок: *а* — процесс формирования ВУЭ; $\delta_3 = 4,5$ мм, $r_p = 45$ мм; *б* — форма ВУЭ из заряда со сфероконической облицовкой (с параметрами $\delta_3 = 5,0$ мм, $r_p = 52$ мм, $t = 250$ мкс); *в* — форма ВУЭ из заряда с облицовкой с широкой конической фаской ($\delta_3 = 4,5$ мм, $r_p = 50$ мм, $t = 250$ мкс)

Трехмерные расчеты функционирования зарядов проводились на зарядах второго типоразмера ($d_3 = 62$ мм). При этом параметры заряда и КО принимались следующими:

- высота заряда $H_3 = 50$ мм;
- толщина корпуса $\delta_k = 3$ мм;
- диаметр основания облицовки $d = d_3 = 62$ мм;
- прогиб облицовки $h = 10,45$ мм;
- радиус перехода в коническую область $r_p = 26$ мм (рис. 5, *а*, *б*);
- толщина КО на периферии $\delta_3 = 2,5$ мм (см. рис. 5, *а*) и $\delta_3 = 2,25$ мм (см. рис. 5, *б*).

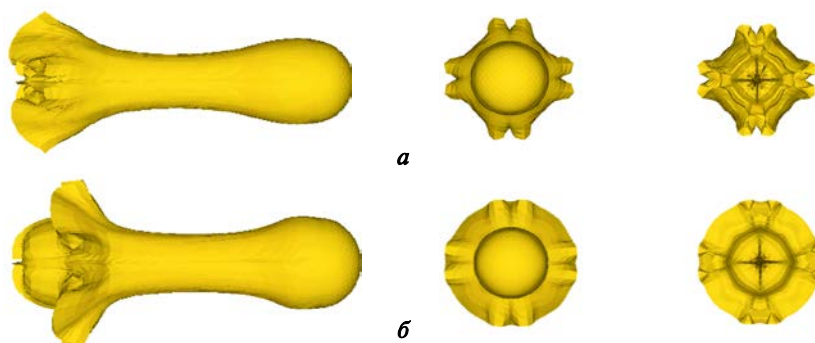


Рис. 5. Формы ВУЭ, получаемые взрывом снарядо-формирующих зарядов с облицовками сфероконического типа с толщиной на периферии $\delta_3 = 2,5$ мм (*а*) и $\delta_3 = 2,25$ мм (*б*)

По результатам выполненных расчетов построена зависимость удлинения летательного элемента (l^*) от относительного радиуса перехода сферической поверхности облицовки в коническую часть (рис. 6, *a*). При этом показано, что увеличение радиуса перехода позволяет получить более длинные элементы. Изменение удлинения ВУЭ можно выразить линейной регрессионной зависимостью (см. рис. 6, *a*):

$$l^* = 6,76r^* - 2,18,$$

где r^* — относительный радиус перехода облицовки, мм, $r^* = 0,5r_p/d$ (d — диаметр основания облицовки, мм).

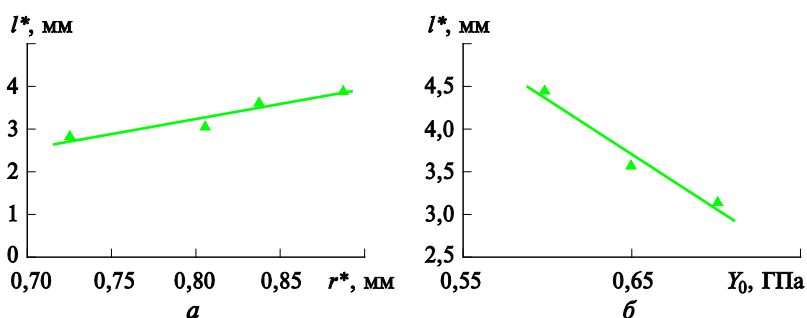


Рис. 6. Зависимость удлинения ВУЭ от радиуса перехода комбинированной сфероконической КО (*a*) и от динамического предела текучести материала (*б*)

Для обоснованного выбора материала облицовки установлена другая зависимость, определяющая линейную регрессию удлинения l^* стальных ВУЭ от динамического предела текучести Y_0 (рис. 6, *б*):

$$l^* = -12,80Y_0 + 12,03.$$

Это выражение показывает, что с увеличением предела текучести удлинение элемента уменьшается, поэтому для облицовки при прочих равных значениях параметров следует выбирать марки более пластичных сталей.

Было установлено, что важным фактором, влияющим на аэродинамическую стабильность движения элемента в воздухе, является наличие в хвостовой части стабилизирующей юбки [7, 13–15, 23]. Результаты расчетов зарядов со сфероконическими облицовками показывают, что диаметр стабилизирующей юбки у ВУЭ, формируемых такими зарядами, существенно больше, чем у элементов, полученных взрывом из сегментных облицовок переменной толщины. По аналогии с описанными выше зависимостями на рис. 7, *a* представлены результаты вычислений, характеризующие изменение диаметра юбки для

ВУЭ, полученных из комбинированных облицовок сфероконического типа. Эти расчеты можно представить линейной зависимостью

$$d_b^* = -5,90r^* + 7,05,$$

где d_b^* — безразмерный максимальный диаметр стабилизирующей юбки, мм, $d_b^* = d_b/d$.

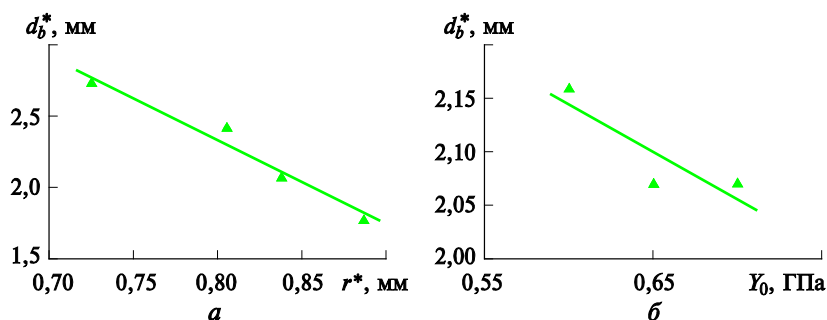


Рис. 7. Зависимости максимального диаметра юбки ВУЭ от радиуса перехода комбинированной сфероконической КО (а) и динамического предела текучести материала (б)

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении радиуса перехода ($r^* = 0,5r_p / d$) удлинение элемента возрастает (см. рис. 6, а), а диаметр юбки уменьшается (см. рис. 7, а), что свидетельствует о сложном характере влияния рассматриваемого параметра и геометрических характеристиках формируемого элемента, определяющих его пробивную способность и аэродинамическую устойчивость.

Представленная на рис. 7, б зависимость описывает изменение максимального диаметра юбки элементов, полученных зарядами с комбинированными сфероконическими облицовками, от динамического предела текучести используемого материала Y_0 . Рассмотренную зависимость можно записать следующим образом:

$$d_b^* = -0,90Y_0 + 2,68.$$

В этом случае с увеличением предела текучести диаметр юбки снижается, а при выборе более пластичного материала юбка увеличивается (см. рис. 7, б). При анализе влияния динамического предела текучести Y_0 на удлинение элемента (см. рис. 6, б) также было отмечено, что снижение Y_0 приводит к возрастанию удлинения. Таким образом, в облицовке заряда следует использовать марки стали, имеющие меньшие значения динамического предела текучести. Ограничением для выбора марки стали следует считать предельные пластические деформации, которых может достигать материал облицовки при формировании ВУЭ.

Заключение. Авторами настоящей статьи было установлено, что для получения высокоскоростных удлиненных элементов, имитирующих фрагменты космического мусора, возможно применение зарядов с металлической облицовкой. На основе представленных данных выявлены функциональные зависимости, определяющие влияние конструктивных параметров кумулятивной облицовки заряда на характеристики эффективности действия формируемого ВУЭ. Показано, что для получения аэродинамически устойчивых элементов, обладающих высокой степенью наполненности, рекомендуется использование комбинированных кумулятивных облицовок сфероконической формы (см. рис. 4). Предложены аналитические зависимости, устанавливающие взаимно однозначную связь между геометрическими параметрами кумулятивных облицовок и характеристиками эффективности действия высокоскоростных удлиненных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Christiansen E.L. *Handbook for Designing MMOD Protection*. NASA, Houston, Texas (USA), 2009, 135 p.
- [2] Poniaeva S.A., Kurakina R.O., Reznikova B.I., Rozova S.I., Zhukova B.G., Chernyshov M.V. Laboratory modelling of an active space experiment using railgun as a launch device. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 63–68.
- [3] Poniaeva S.A., Kurakina R.O., Sedova A.I., Bobasheva S.V., Zhukova B.G., Nechunayev A.F. Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 26–33.
- [4] Rumiantsev B.V., Mikhaylin A.I. Phase transition effect on efficiency of screen protection against elongated hyper-velocity projectiles. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 15–20.
- [5] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 298 p.
- [6] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. 3-е изд., перераб. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [7] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [8] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов*. 2-е изд, испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 518 с.
- [9] Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. *Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 68 с.
- [10] Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов. *Физика горения и взрыва*, 2015, т. 51, № 1, с. 150–164.
- [11] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. Compact element formation for the modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth conditions. *Acta Astronautica*, 2017, no. 135, pp. 34–43.
- [12] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, no. 163, pp. 84–90.

- [13] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017, вып. 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-12-1714
- [14] Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018, вып. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1782
- [15] Cardoso D., Teixeira-Dias F. Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP). *International Journal of Impact Engineering*, 2016, no. 93, pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.014
- [16] Weimann K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 1993, vol. 18, iss. 5, pp. 294–298.
- [17] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. Hydrocode Simulation with Modified Johnson-Cook Model and Experimental Analysis of Explosively Formed Projectiles. *Journal of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [18] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanaullah K. Analytical performance study of explosively formed projectiles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, no. 54 (1), pp. 10–20.
- [19] Pappu S., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37, iss. 2, pp. 233–248.
- [20] Wu J., Liu J., Du Y. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, iss. 7, pp. 1147–1162.
- [21] Rolc S., Buchar J., Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP). In: *Proc. of the 23th Int. Symp. on Ballistics*. Tarragona, Madrid, Spain, 16–20 April 2007, Universidad Politécnica de Madrid, International Ballistics Committee. Madrid, 2007, pp. 185–192.
- [22] Borkowski J., Wilk Z., Koslik P., Szymanczyk L., Zygmunt B. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 118, pp. 91–97.
- [23] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.002
- [24] Bender D., Chhouk B., Fong R., Rice B., Volkmann E. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. In: *19th International Symposium on Ballistics*. Interlaken, Switzerland, 7–11 May 2001, Defence Science and Technology Organization, the International Ballistics Committee. Interlaken, DEStech Publications, 2001, pp. 755–761.
- [25] Li R., Li W.B., Wang X.M. Effects of control parameters of three-point initiation on the formation of an explosively formed projectile with fins. *Shock Waves*, 2018, vol. 28, iss. 2, pp. 191–204.
- [26] Круглов П.В., Колпаков В.И., Болотина И.А. Особенности процесса создания компактных элементов изменяемой формы из металлических облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-11-1917
- [27] Гелин Д.В., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Сотский М.Ю., Селиванов В.В. Новые технические решения для получения дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1747

- [28] Климачков С.И., Охитин В.Н. Параметры подводного взрыва разнесенных зарядов с задержкой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-8-1526
- [29] Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. DOI: 10.18968/2308-6033-2017-9-1674
- [30] Круглов П.В., Болотина И.А. Совершенствование технологии изготовления дисковых заготовок для металлических облицовок компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1787
- [31] Круглов П.В., Сгибнев А.В. Выбор параметров технологических операций механической обработки на основе учета коэффициента вариации стойкости инструмента. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 6. DOI: 10.7463/0614.0714287
- [32] Круглов П.В., Сгибнев А.В. Автоматизация контрольных, испытательных и регулировочных работ после сборки автоматических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 3, с. 140–147.
- [33] Круглов П.В., Тарасов В.А. Метод генерации проектных решений сборки изделий с применением ориентированных гиперграфов. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (дата обращения 20.06.2018).
- [34] Круглов П.В., Тарасов В.А., Болотина И.А. Метод формирования совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (дата обращения 20.06.2018).
- [35] Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1494

Статья поступила в редакцию 26.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Колпаков В.И., Болотина И.А. Моделирование процесса создания высокоскоростных удлиненных элементов с изменяемой формой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1937>

Круглов Павел Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kp17@bmstu.ru

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Болотина Ирина Алексеевна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru

Simulating the process of making high-speed elongated elements with a variable shape

© P.V. Kruglov, V.I. Kolpakov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study proposes to use charges forming high-speed elongated elements (HSEE) with a variable shape for ground-based simulation of the penetration of particles and elements into the spacecraft's hull. During the operation of such a charge, an explosive throws a metal lining over a distance of several hundred charge diameters. The metal segment lining is deformed during the throwing process and takes the form of an elongated element. In calculations we used steel linings with a degressive and progressive profile whose outer and inner surfaces are formed by spherical surfaces, as well as by a combination of spherical and conical surfaces. The paper shows the results of a numerical analysis which determines the effect of the geometric and physico-mechanical parameters of segmented cumulative linings on the efficiency of the charges forming high-speed elongated elements. The efficiency of the charges was determined by the characteristics of the formed element, i.e. elongation, degree of fullness and the diameter of the horizontal stabilizer. Furthermore, we established the dependences which describe the effect of the lining material dynamic yield point and the radius of transition of the spherical surface to the conical surface on the elongation of the element and the diameter of the horizontal stabilizer. We also showed the possible contradictory effect of changing the radius of transition of the spherical surface of the lining into the conical surface on the aerodynamic stability parameters of the high-speed elongated element.

Keywords: high-speed elongated elements, space debris, metal lining, meteoroid protection, numerical simulation

REFERENCES

- [1] Christiansen E.L. *Handbook for Designing MMOD Protection*. NASA, Houston, Texas (USA), 2009, 135 p.
- [2] Poniaeva S.A., Kurakina R.O., Reznikova B.I., Rozova S.I., Zhukova B.G., Chernyshov M.V. Laboratory modelling of an active space experiment using railgun as a launch device. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 63–68.
- [3] Poniaeva S.A., Kurakina R.O., Sedova A.I., Bobasheva S.V., Zhukova B.G., Nechunaev A.F. Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 26–33.
- [4] Rumiantsev B.V., Mikhaylin A.I. Phase transition effect on efficiency of screen protection against elongated hyper-velocity projectiles. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 15–20.
- [5] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 298 p.
- [6] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In 2 vols. Vol. 2. 3rd edition. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [7] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy* [Munitions]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [8] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Numerical methods in

- problems of physics of high-speed processes]. 2nd ed., revised. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 518 p.
- [9] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical simulation of shaped charge operation]. Moscow, BMSTU Publ., 1998, 68 p.
- [10] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 150–164.
- [11] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. *Acta Astronautica*, 2017, no. 135, pp. 34–43.
- [12] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. *Acta Astronautica*, 2019, no. 163, pp. 84–90.
- [13] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [14] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [15] Cardoso D., Teixeira-Dias F. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, no. 93, pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.014
- [16] Weimann K. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 1993, vol. 18 (5), pp. 294–298.
- [17] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. *J. of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [18] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanaullah K. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, no. 54 (1), pp. 10–20.
- [19] Pappu S., Murr L.E. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37 (2), pp. 233–248.
- [20] Wu J., Liu J., Du Y. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34 (7), pp. 1147–1162.
- [21] Rolc S., Buchar J., Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP). *Proc. of the 23th Int. Symp. on Ballistics*, 2007, pp. 185–192.
- [22] Borkowski J., Wilk Z., Koslik P., Szymanczyk L., Zygmunt B. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 118, pp. 91–97.
- [23] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI:10.1016/j.dt.2014.05.002
- [24] Bender D., Chhouk B., Fong R., Rice B., Volkmann E. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. *19th International Symposium on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 755–761.
- [25] Li R., Li W.B., Wang X.M. *Shock Waves*, 2018, vol. 28 (2), pp. 191–204.
- [26] Kruglov P.V., Kolpakov V.I., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1917>
- [27] Gelin D.V., Lysov D.A., Markov V.A., Sotskiy M.Yu., Selivanov V.V., Gelin N.D., Sotskaya M.M. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1747>
- [28] Klimachkov S.I., Ohitin V.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-8-1526
- [29] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1674
- [30] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 8.

- DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1787
- [31] Kruglov P.V., Sgibnev A.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 6. DOI: 10.7463/0614.0714287
- [32] Kruglov P.V., Sgibnev A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 140–147.
- [33] Kruglov P.V., Tarasov V.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (accessed June 20, 2018).
- [34] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Bolotina I.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (accessed June 20, 2018).
- [35] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1494>

Kruglov P.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 scientific publications in the field of special-purpose mechanical engineering technologies.
e-mail: kpv17@bmstu.ru

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 scientific publications in the field of numerical simulation of dynamic processes.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Bolotina I.A., Assist. Lecturer, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific publications in the field of mechanical engineering technologies, has 8 inventor's certificates.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru