

## **Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов**

© П.В. Круглов, В.И. Колпаков

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

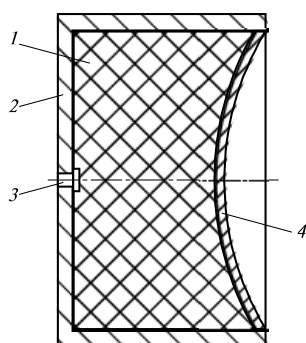
*Рассмотрена задача определения физико-механических и геометрических параметров металлических сегментных облицовок современных кумулятивных снарядоформирующих зарядов. Установлены параметры облицовок, формирующих высокоскоростные удлиненные элементы, которые обеспечивают большую эффективность действия. В качестве параметров, влияющих на форму высокоскоростного элемента, выбраны геометрические характеристики внутренней и наружной сферических поверхностей облицовки с разной толщиной вдоль образующей, а также прочность материала облицовки. Искомыми параметрами формы высокоскоростного элемента являются его удлинение, наполненность, диаметр юбки стабилизатора в хвостовой части элемента. По результатам расчетов установлены зависимости между параметрами стальных облицовок и высокоскоростных удлиненных элементов. Предложены рекомендации по выбору формы облицовки.*

**Ключевые слова:** *снарядоформирующие заряды, численное моделирование, высокоскоростные элементы, удлиненные элементы*

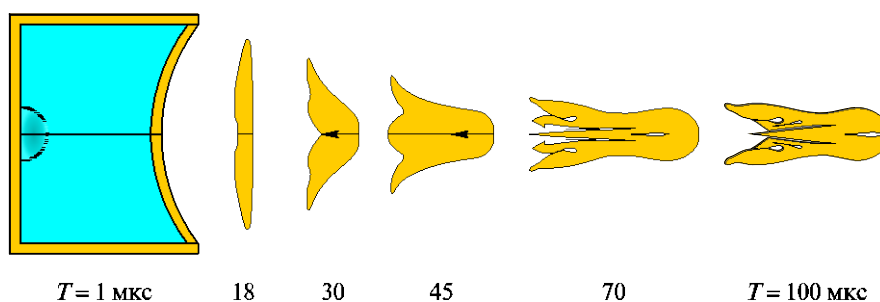
**Введение.** Для пробивания прочных преград используют кумулятивные заряды, образующие высокоскоростные удлиненные элементы с изменяемой в процессе полета геометрической формой [1–3]. Элемент образуется путем деформирования металлической сегментной облицовки, выполненной, как правило, из пластичной стали, меди или других металлов, в результате взрыва заряда [4–9]. Для устойчивости во время полета ему стараются придать такую форму, чтобы в хвостовой части сформировалась юбка, служащая стабилизатором [10–16]. В данной работе исследуются механизмы влияния конструктивных параметров облицовки на форму и устойчивость высокоскоростных удлиненных элементов путем математического моделирования взрывных процессов с использованием численных методов механики сплошной среды.

**Описание проблемы.** Снарядоформирующий заряд (СФЗ) состоит из корпуса 2, заряда взрывчатого вещества 1, металлической облицовки 4 и детонатора 3 (рис. 1).

После взрыва металлическая облицовка изменяет свою форму и в зависимости от физико-механических, геометрических параметров заряда может принимать компактную или удлиненную (рис. 2) форму.

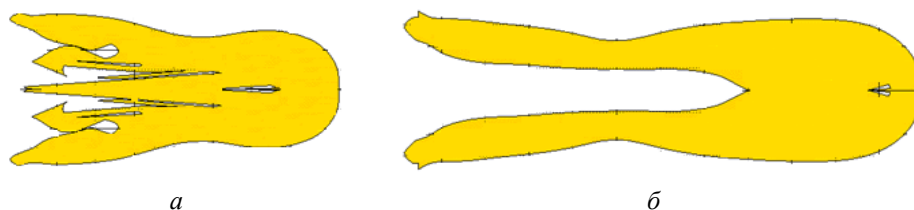


**Рис. 1.** Схема СФЗ:  
1 — заряд взрывчатого вещества; 2 — корпус; 3 — детонатор; 4 — облицовка



**Рис. 2.** Функционирование СФЗ и получение высокоскоростного удлиненного элемента

Преимуществами удлиненной формы элемента перед компактной являются большая пробивная способность при той же массе элемента и меньшее сопротивление среды на этапе полета, что приводит к большей дальности полета элемента [17–19]. По сравнению с компактным элементом высокоскоростной удлиненный элемент имеет большее отношение длины элемента к диаметру, называемое *удлинением*  $l^*$  элемента. К удлиненным относят высокоскоростные элементы с  $l^* > 2$ . Другой важной характеристикой высокоскоростного элемента является его *наполненность*. Чем больше наполненность элемента, тем больше его пробивное действие (рис. 3).



**Рис. 3.** Высокоскоростной удлиненный элемент большей (а) и меньшей (б) наполненности

Изучением механизмов создания удлиненных элементов занимаются ученые разных стран [10–16, 18], в том числе и России [1–8, 20–22]. Как показывают результаты исследований, на форму высокоскоростного элемента оказывают влияние такие характеристики заряда, как геометрические параметры корпуса и заряда взрывчатого вещества, физико-механические свойства материалов, из которых изготовлен корпус и облицовка, энергетические параметры взрывчатого вещества. Наибольшее влияние на форму и наполненность высокоскоростного удлиненного элемента оказывают физико-механические свойства материала облицовки и ее геометрические параметры. Вместе с тем в нашей стране отсутствуют методики, описывающие взаимосвязь параметров облицовки и элемента. Изучению механизмов формирования высокоскоростного удлиненного элемента и выявлению зависимостей между формой элемента и облицовки посвящена данная работа. Поскольку проведение натурных экспериментов дороже вычислительных, авторы применяли методы математического моделирования функционирования СФЗ на основе численных методов механики сплошных сред [1, 3].

**Исходные данные для расчетов функционирования зарядов.**

В настоящем исследовании были проведены вычислительные эксперименты, в которых использовалась модель кумулятивного заряда с сегментной стальной облицовкой [3]. В облицовке внутренняя и наружная поверхности описывались сферическими поверхностями. В различных вариантах расчетов изменяли разнотолщинность, т. е. толщину профиля облицовки вдоль радиального направления, и динамический предел текучести  $Y_0$  материала облицовки. Рассматривали три схемы облицовки: толщина профиля облицовки от центра к периферии принималась постоянной, уменьшалась (дегрессивная форма, рис. 4, а) или увеличивалась (прогрессивная форма, рис. 4, б).

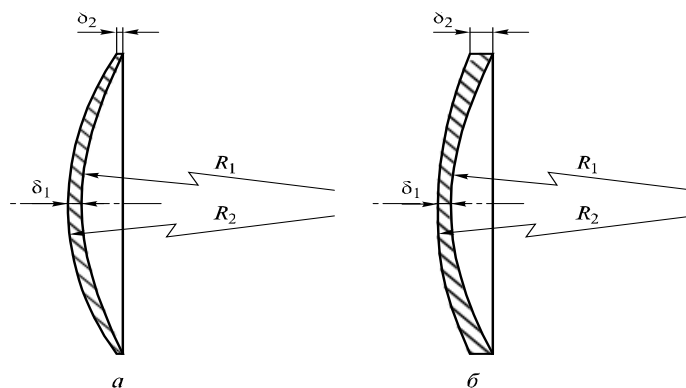


Рис. 4. Варианты облицовок СФЗ:

а — дегрессивная; б — прогрессивная;  $R_1, R_2$  — радиус внутренней и наружной сферической поверхности соответственно;  $\delta_1, \delta_2$  — толщина облицовки в центре и в периферийной области соответственно

Расчеты были проведены для двух модельных СФЗ геометрически подобных типоразмеров.

**СФЗ № 1:** диаметр заряда взрывчатого вещества (или внутренний диаметр корпуса)  $d_3 = 62$  мм; высота заряда  $H = 50$  мм; толщина корпуса  $d_k = 3$  мм. Диаметр облицовки  $d = d_3 = 62$  мм, прогиб облицовки — 10,45 мм. Использовали облицовку постоянной и переменной толщины. В первом случае толщина облицовки в центральной и периферийной частях составляла  $\delta_1 = 2,5$  и  $\delta_2 = 3,1$  мм соответственно, во втором —  $\delta_1 = 2,5$  и  $\delta_2 = 2,2 \dots 2,8$  мм для дегрессивной формы кумулятивной облицовки и  $\delta_1 = 2,5$  и  $\delta_2 = 3,3 \dots 4,0$  мм для облицовок прогрессивной формы.

**СФЗ № 2:** диаметр заряда взрывчатого вещества  $d_3 = 125$  мм; высота заряда  $H = 100$  мм; толщина корпуса  $d_k = 6$  мм. Диаметр облицовки  $d = 31$  мм, прогиб облицовки 20,88 мм. Как и для СФЗ № 1, использовали облицовку постоянной и переменной толщины. Здесь в первом случае толщина облицовки в центральной и периферийной частях составляла  $\delta_1 = 5,0$  мм и  $\delta_2 = 6,2$  мм соответственно, во втором —  $\delta_1 = 5,0$  мм и  $\delta_2 = 4,5 \dots 6,1$  мм для дегрессивной формы кумулятивной облицовки и  $\delta_1 = 5,0$  мм и  $\delta_2 = 6,3 \dots 8,0$  мм для облицовок прогрессивной формы.

В СФЗ № 1 и № 2 использовались материалы со следующими физико-механическими характеристиками [3, 5]:

- облицовка — стали марок 08кп, 11кп, 11ЮА (плотность  $\rho_0 = 7,85$  г/см<sup>3</sup>, модуль объемного сжатия  $K_0 = 175$  ГПа, динамический предел текучести  $Y_0 = 0,65 \dots 0,75$  ГПа, модуль сдвига  $G = 80$  ГПа, откольная прочность  $\sigma^* = 1,65$  ГПа, относительное сужение материала  $\psi = 0,45 \dots 0,75$ );

- корпус — сталь марки 45Х; взрывчатое вещество — ТГ40 (плотность  $\rho_{ВВ} = 1,68$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $D_{ВВ} = 7,85$  км/с, теплота взрывчатого превращения  $Q_{ВВ} = 4,61$  МДж/кг).

Для обоих зарядов применялось одноточечное инициирование.

**Анализ результатов.** Результаты расчетов обрабатывались так, что для каждого высокоскоростного удлиненного элемента были получены его удлинение  $l^*$  и наполненность  $w^*$ , а также относительный диаметр  $d_{ю}^*$  юбки. Под *наполненностью*  $w^*$  понимается отношение массы полученного элемента к массе такого же, но полностью заполненного материалом в пределах наружного контура элемента, а под *относительным диаметром*  $d_{ю}^*$  юбки — отношение диаметра юбки к среднему диаметру головной части.

На рис. 5 приведен пример изменения формы высокоскоростного удлиненного элемента в зависимости от толщины облицовки на периферии. Видно, что при увеличении толщины периферийной области возрастает удлинение, но уменьшаются наполненность и относительный диаметр юбки.

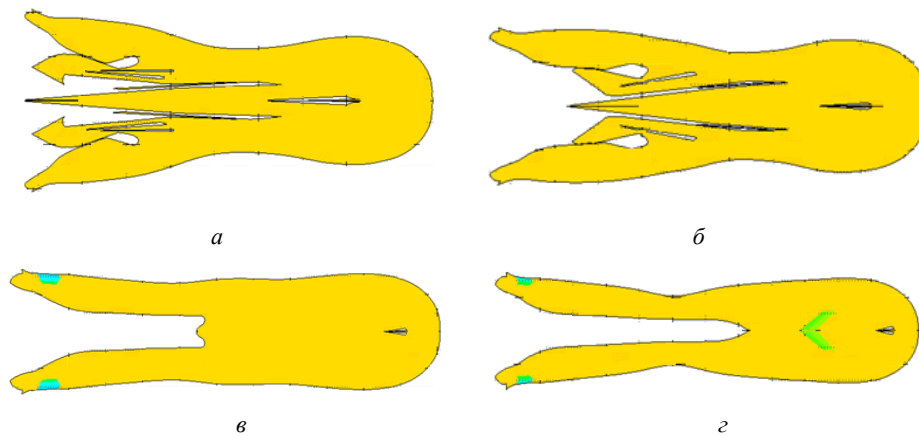


Рис. 5. Высокоскоростные удлиненные элементы, получаемые из облицовок различной формы с толщиной  $\sigma_2 = 2,5$  (а), 2,7 (б), 3,1 (в) и 3,3 мм (г)

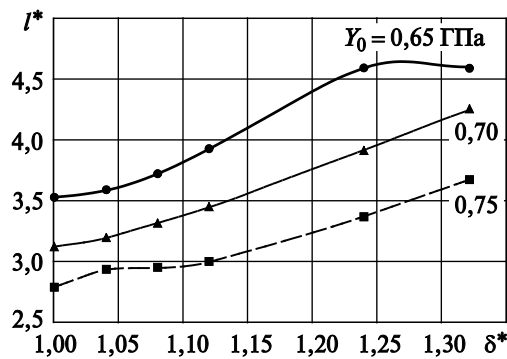
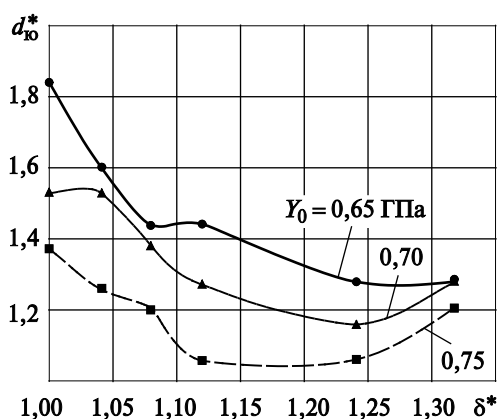


Рис. 6. Зависимость удлинения  $l^*$  высокоскоростного элемента от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки при различных значениях динамического предела текучести  $Y_0$

На рис. 6 представлены зависимости удлинения  $l^*$  элемента от относительной толщины  $\delta^*$  на периферии. Относительная толщина  $\delta^*$  рассчитывается как отношение толщины на периферии к толщине в центре облицовки. Расчеты проводились на модели СФЗ № 1 при различных значениях динамического предела текучести  $Y_0$ . Полученные данные показывают, что при снижении  $Y_0$  удлинение элемента увеличивается. Удлинение элемента возрастает также и при увеличении относительной толщины периферийной области облицовки. На рис. 6 видно, что для достижения удлинения более 4 единиц для данного заряда необходимо применять равнотолщинные или прогрес-

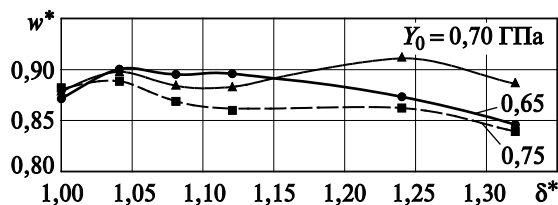
сивные облицовки с динамическим пределом текучести не более 0,7 ГПа. При использовании облицовок дегрессивной формы с  $\delta^* < 1,12$  получить элемент  $l^* > 4$  в данных условиях невозможно.

Увеличение относительной толщины  $\delta^*$  облицовки на периферии приводит к уменьшению относительного диаметра  $d_{ю}^*$  юбки элемента (рис. 7). Кроме того, отмечено, что чем меньше динамический предел текучести материала облицовки, тем больше диаметр юбки элемента.



**Рис. 7.** Зависимость относительного диаметра  $d_{ю}^*$  юбки от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки при различных значениях динамического предела текучести  $Y_0$

Наполненность элемента, так же как и диаметр юбки, снижается при увеличении относительной толщины  $\delta^*$  (рис. 8) до достижения ею значения 1,24, что соответствует равнотолщинной облицовке.



**Рис. 8.** Зависимость наполненности  $w^*$  элемента от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки при различных значениях динамического предела текучести  $Y_0$

У элементов из облицовок прогрессивной формы относительный диаметр юбки больше, чем у элементов из равнотолщинных облицовок. Это объясняется тем, что юбка элемента формируется из периферийных областей облицовки, где объем материала у облицовок прогрессивных форм больше, чем у облицовок равнотолщинных и дегрессивных форм.

Таким образом, возникает неопределенность при выборе формы облицовки, поскольку для увеличения пробивной способности необходим рост удлинения и наполненности одновременно, а в данном случае изменение толщины облицовки на периферии приводит к изменению этих параметров в противоположные стороны. В то же время для повышения точности попадания в цель необходимо определенное увеличение диаметра юбки. Для выбора наилучшего варианта требуются дополнительные исследования точности попадания в цель и пробивной способности элементов с разными удлинением, наполненностью и диаметром юбки.

По предварительным оценкам, влияние наполненности элемента на пробивную способность сильнее, чем влияние удлинения, поэтому более целесообразно использовать элементы с большей наполненностью и одновременно развитой юбкой, формирование которой позволит повысить точность попадания элемента в цель. Таким образом, заряды с облицовками дегрессивной формы имеют преимущество перед зарядами с облицовками прогрессивной и равнотолщинной форм.

Были проведены расчеты модели СФЗ № 2, на основе которых получены зависимости удлинения  $l^*$  (рис. 9), относительного диаметра  $d_{ю}^*$  юбки (рис. 10) и наполненности  $w^*$  (рис. 11) от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки при значении динамического предела текучести  $Y_0 = 0,65$  ГПа.

В целом представленные результаты не противоречат расчетам модели СФЗ № 1. При увеличении относительной толщины  $\delta^*$  относительный диаметр юбки и наполненность уменьшаются (см. рис. 10 и 11), а удлинение увеличивается (см. рис. 9).

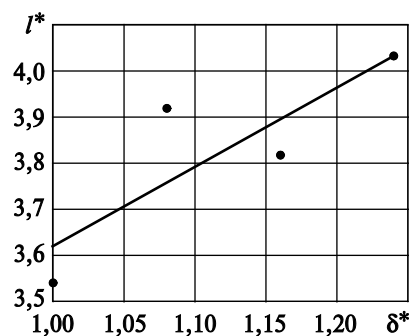
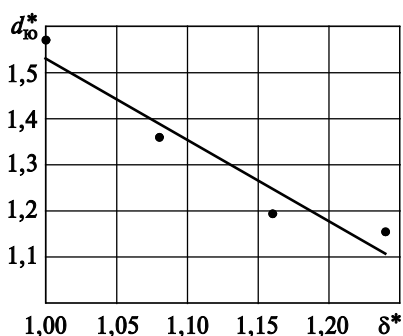
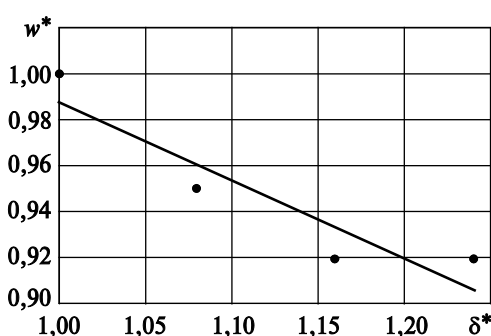


Рис. 9. Зависимость удлинения  $l^*$  высокоскоростного элемента от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки СФЗ № 2



**Рис. 10.** Зависимость относительного диаметра  $d_{ю}^*$  юбки от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки СФЗ № 2



**Рис. 11.** Зависимость наполненности  $w^*$  элемента от относительной толщины  $\delta^*$  периферийной области облицовки СФЗ № 2

**Заключение.** По расчетным данным получены графические зависимости изменения параметров формы высокоскоростного удлиненного элемента от разнотолщинности и физико-механических параметров материала облицовки снарядоформирующего заряда. Как показывают результаты исследований, для облицовок дегрессивных форм возможно формирование удлиненных высокоскоростных элементов с развитой хвостовой частью, что положительно сказывается на аэродинамической устойчивости элемента в процессе полета. Для зарядов с прогрессивной формой облицовки характерно получение более длинных, но слабонаполненных элементов, что негативно сказывается на их пробивной способности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (дата обращения 10.12.2016).
- [2] Селиванов В.В., ред. *Боестрелки*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [3] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>



- [4] Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Шикунев Н.В. Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий. *Оборонная техника*, 2010, № 1–2, с. 82–89.
- [5] Потапов И.В., Колпаков В.И., Шикунев Н.В., Якимович Г.А. Математическое моделирование взрывного формирования стальных поражающих элементов. *Shock Waves in Condensed Matter: Int. Conference. Saint-Petersburg – Novgorod (Russia)*, 2010, pp. 184–188.
- [6] Колпаков В.И. Особенности деформирования и разрушения удлиненных поражающих элементов при взрывном нагружении кумулятивных облицовок. *XIII Харитоновские тематические научные чтения. Тр. междунар. конф.* Саров, 2012, с. 532–536.
- [7] Колпаков В.И. Анализ конструктивных особенностей зарядов с низкими сегментными кумулятивными облицовками из танталовых сплавов. *Сб. тез. докл. междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015, с. 288–290.
- [8] Колпаков В.И., Горюнов В.В. Математическое моделирование процесса взрывного формирования удлиненного поражающего элемента из высокоплотного материала. *Оборонная техника*, 2011, № 2–3, с. 30–34.
- [9] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2002, 656 с.
- [10] Bender D., Chhouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkmann E. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. *19th Int. Symp. of Ballistics*, 2001, pp. 755–762.
- [11] Held M. The shaped charge potential. *20th Int. Symp. of Ballistics*, 2002, pp. 81–90.
- [12] 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 (дата обращения 16.02.2018).
- [13] Хуссейн Г., Хамид А., Хетерингтон Д.Г., Малик А.К., Санауллах К. Аналитическое исследование эффективности снарядов, формируемых взрывом. *Прикладная механика и техническая физика*, 2013, т. 54, № 1, с. 13–24.
- [14] Rappu M., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *J. of material science*, 2002, no. 37, pp. 233–248.
- [15] Ли В., Ван С., Ли В., Чень К. Исследование технологии формирования устойчивого ударного ядра с юбкой. *Прикладная механика и техническая физика*, 2016, т. 57, № 5, с. 151–157.
- [16] 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. *J. of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453 (дата обращения 16.02.2018).
- [17] Михалев А.Н., Подласкин А.Б. Исследования перспективных форм далекодействующих ударных ядер. *Изв. РАН*, 2009, № 1 (59), с. 3–9.
- [18] Михалев А.Н. Формируемые взрывом снаряды: аэродинамические свойства и методики формирования (обзор по данным зарубежных работ). *Препринт*. ФТИ им. А.Ф. Иоффе. № 1775, 2004, 38 с.
- [19] Михалев А.Н., Подласкин А.Б. Исследования обтекания и аэродинамики ударных ядер на баллистической установке. *Фундаментальные основы баллистического проектирования. Сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф.* СПб., 2011, т. 1, с. 100–108.
- [20] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Возможность компьютерного моделирования функционирования снарядоформирующих зарядов с алюми-

- низированными взрывчатыми веществами при разработке прототипов боеприпасов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 2, с. 108–126.
- [21] Соколов С.С., Садовой А.А., Чайка Т.И. Математическое моделирование формирования высокоскоростных компактных металлических элементов. *ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов*, 2004, вып. 3, с. 54–61.
- [22] Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. URL: <http://dx.doi.org/10.18968/2308-6033-2017-9-1674>.

Статья поступила в редакцию 06.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлинённых элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года*

**Круглов Павел Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций в области технологий специального машиностроения. e-mail: [kp17@bmstu.ru](mailto:kp17@bmstu.ru)

**Колпаков Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области численного моделирования динамических процессов. e-mail: [kolpakov54@mail.ru](mailto:kolpakov54@mail.ru)

## Analysis of influence of metal linings profile heterogeneity on the high-speed elongated elements shape

© P.V. Kruglov, V.I. Kolpakov

Bauman Moscow State Technical University Moscow, 105005, Russia

*The article considers the problem of determining physico-mechanical and geometric parameters of modern metal lining for cumulative charges. The study establishes parameters of the linings, which form high-speed elongated elements that provide greater action efficiency. As the parameters influencing the high-speed element shape, we choose the geometric characteristics of the inner and outer spherical surfaces of the lining with different thickness along the generatrix, and the lining material strength. The required high-speed elements shape parameters are elongation, fullness, and stabilizer skirt diameter in the element tail part. Based on calculation results, the paper establishes a ratio between the steel lining parameters and high-speed elongated elements ones, as well as offers the recommendations on the lining shape choice.*

**Keywords:** charge-forming charges, numerical simulation, high-speed elements, elongated elements

### REFERENCES

- [1] Kolpakov V.I. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (accessed December 10, 2016).
- [2] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy. V 2 tomakh. Tom 1* [Ammunition. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [3] Kruglov P.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 12. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [4] Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Shikunov N.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2010, no. 1–2. pp. 82–89.
- [5] Potapov I.V., Kolpakov V.I., Shikunov N.V., Yakimovich G.A. Matematicheskoe modelirovanie vzravnogo formirovaniya stalnykh porazhayuschykh elementov [Mathematical modeling of explosive formation of steel projectiles]. *Shock Waves in Condensed Matter: Int. Conference*. St. Petersburg, Novgorod (Russia), 2010, pp. 184–188.
- [6] Kolpakov V.I. Osobennosti deformirovaniya i razrusheniya udlinennykh porazhayuschykh elementov pri vzravnom nagruzhении kumulyativnykh oblitsovok [Features of deformation and destruction of elongated projectiles during explosive loading of shaped lining]. *Trudy mezhdunar. konf. “XIII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye sostoyaniya veschestva. Detonatsiya. Udarnye volny” (Sarov, 14–18 marta 2011 g.)* [Proc. of the Int. Conf. “XIII Kharitonov thematic scientific readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock Waves” (Sarov, March 14–18, 2011)]. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2012, pp. 532–536.
- [7] Kolpakov V.I. Analiz konstruktivnykh osobennostey zaryadov s nizkimi segmentnymi kumulyativnymi oblitsovkami iz tantalovykh splavov [Analysis of design features of charges with low segment shaped linings made of tantalum alloys]. *Trudy mezhdunar. konf. “XVIII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye sostoyaniya veschestva. Detonatsiya. Udarnye volny”*

- [Proc. of the Int. Conf. “XVII Kharitonov thematic scientific readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock Waves” (Sarov, March 23–27, 2015)]. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2012, pp. 288–290.
- [8] Kolpakov V.I., Goryunov V.V. *Oboronnaya tekhnika — Deference technology*, 2011, no. 2–3, pp. 30–34.
- [9] Orlenko L.P., ed., *Fizika vzryva. V 2 tomakh. Tom 2* [Physics of explosion. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 656 p.
- [10] Bender D., Chouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkmann E. *Explosively Formed Penetrators (EFP) with Canted Fins* [Proc. of the 19th International Symposium on Ballistics]. 2001, vol. 2, pp. 755–762.
- [11] Held M. The Shaped Charge Potential. *Proc. of the 20th International Symposium of Ballistics*, 2002, pp. 81–90.
- [12] 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 (accessed February 16, 2018).
- [13] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanullah K. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 13–24.
- [14] Pappu M., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *Journal of Materials Science*, 2002, no. 37, pp. 233–248.
- [15] Li W., Wang S., Chen K. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 5, pp. 151–157.
- [16] 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, 31, vol. 2, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453 (accessed February 16, 2018).
- [17] Mikhalev A.N., Podlaskin A.B. *Izvestiya RAN — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 1(59), pp. 3–9.
- [18] Mikhalev A.N. *FTI im. A.F. Ioffe. Preprint (Preprint of the Ioffe Institute)*, 2004, no. 1775, 38 p.
- [19] Mikhalev A.N., Podlaskin A.B. Issledovaniya obtekaniya i aerodinamiki udarnykh yader na ballisticheskoy ustanovke [Studies of the flow and aerodynamics of explosively formed penetrators on a ballistic installation]. *Fundamentalnye osnovy ballisticheskogo proektirovaniya: Sb. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Fundamentals of ballistic design: coll. pap. of all-Russ. sc. and tech. conf.]. St. Petersburg, 2011, vol. 1, pp. 100–108.
- [20] Andreev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 2, pp. 108–126.
- [21] Sokolov S.S., Sadovoy A.A., Chayka T.I. *VANT, ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov — Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki (VANT), series Mathematical Modeling of Physical Processes*, 2004, no. 3, pp. 54–61.
- [22] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>

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

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