

Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок

© П.В. Круглов, В.И. Колпаков

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

Рассмотрены результаты математического моделирования функционирования снарядоформирующих зарядов с использованием численных методов механики сплошной среды. Представлены варианты совершенствования таких зарядов, обеспечивающие повышение эффективности их действия. Описаны данные вычислительных экспериментов с различными конструктивными параметрами стальных сегментных облицовок. Математические модели зарядов двух типоразмеров исследованы в двумерной и трехмерной постановках. Показано, что наилучшие характеристики удлиненных высокоскоростных элементов можно получить путем использования сфероконических облицовок и облицовок с развитой фаской. В моделях с различными физико-механическими свойствами облицовок, в частности, продемонстрирован механизм формирования поражающего элемента из облицовки с градиентной в радиальном направлении пластичностью. Обосновано применение упруго-пластической модели деформирования и критерия разрушения в форме критерия Смирнова — Аляева.

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

Введение. Для проникания в прочные преграды используются различные способы. Традиционным является применение кумулятивных зарядов, в которых энергия взрыва деформирует металлическую облицовку внутренней поверхности заряда и сообщает облицовке высокую осевую скорость. Существенное место среди кумулятивных зарядов занимают так называемые снарядоформирующие заряды (СФЗ) [1–7]. Они состоят (рис. 1, а) из металлической кумулятивной облицовки, корпуса, детонатора, взрывчатого вещества. В зависимости от конструктивных параметров заряда в результате его функционирования формируется поражающий элемент — компактное ударное ядро или удлиненный высокоскоростной элемент (УВЭ). Поражающие элементы отличаются один от другого по форме. Ударное ядро, как правило, характеризуется удлинением элемента — отношением его длины к диаметру, по значению близким к единице.

Описание проблемы. Особенность применения СФЗ заключается в необходимости попадания высокоскоростного элемента в цель на большом расстоянии от точки срабатывания — до 1000 калибров. При таком условии, как известно, большой пробивной способностью

обладают УВЭ с удлинением более 3 [4–7] — они сохраняют свою сплошность на траектории и имеют достаточный запас аэродинамической устойчивости.

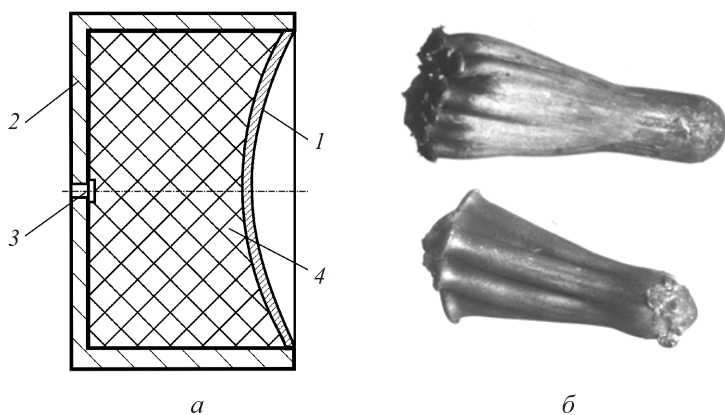


Рис. 1. Схема снарядоформирующего заряда (а) и форма удлиненного высокоскоростного элемента (б) [7]:

1 — облицовка; 2 — корпус; 3 — детонатор; 4 — взрывчатое вещество

Для создания устойчивого в полете УВЭ применяются различные способы. Наиболее эффективными из них являются следующие: создание «юбки» в хвостовой части (благодаря которой сохраняется аэродинамическая устойчивость элемента (рис. 1, б)); формирование в комбинации с «юбкой» стабилизирующего вращения элемента вокруг продольной оси (оси полета), что обеспечивает гироскопический эффект.

При увеличении диаметра «юбки» и росте удлинения устойчивость УВЭ в продольном направлении повышается, что не дает возможности ему переворачиваться вокруг центра масс поперек оси полета. Если получается слишком большая «юбка», тогда повышается аэродинамическое лобовое сопротивление от набегающего потока, снижается скорость и, как следствие, уменьшается глубина пробития. К тому же важной характеристикой УВЭ, которая влияет на пробивную способность, является степень его наполненности [7].

Форма и устойчивость УВЭ наряду с физико-механическими характеристиками используемого материала облицовки — важнейшие факторы, которые обеспечивают пробивное действие зарядов, формирующих УВЭ.

Сложность процесса формирования УВЭ такова, что надежно и достоверно предсказать его конечную форму практически невозможно. Для определения его параметров необходимы натурные эксперименты. В настоящее время в целях ускорения и удешевления работ широко применяются методы математического моделирования функ-

ционирования СФЗ с получением характеристик высокоскоростных элементов и их последующим сравнением с данными известных экспериментов. Вместе с тем недостаточно изучено поведение материалов при экстремальных нагрузках и скоростях деформации и особенно при разрушении. Поэтому следует проводить дополнительные исследования для надежного прогнозирования формы УВЭ и в целях совершенствования самих моделей.

Закономерности функционирования зарядов, формирующих УВЭ, изучают многие научные коллективы [1–14]. Зарубежными авторами [8, 11, 13–15] показано, что получение из облицовок УВЭ с «юбкой» в хвостовой части проблематично, и в экспериментах не всегда удается получить целостные, с достаточным удлинением элементы. Тем не менее использование «юбки» позволяет увеличить точность попадания в цель [8, 16–18]. Совершенствуя форму медной облицовки путем численных расчетов [14], можно найти такие параметры заряда, которые позволят сформировать оптимальную форму «юбки». Исследование скоростных характеристик УВЭ описано в работе [12], варианты усовершенствованных математических моделей их формирования представлены в работах [15, 20] в целях приближения результатов расчетов к экспериментальным данным. В работе [19] приведены результаты использования взрывчатых веществ новых составов. Авторами работы [21] проанализированы технологические возможности изготовления облицовок переменной толщины для СФЗ.

Цель данной работы — рассмотреть и проанализировать закономерности влияния различных параметров СФЗ на удлинение, целостность, форму и степень наполненности УВЭ: форму и материал облицовки, параметры заряда.

Постановка задачи. В рамках совершенствования математических моделей функционирования СФЗ были проведены расчеты с использованием материалов кумулятивной облицовки с различными критериями разрушения, выполнено сравнение результатов моделирования формирования УВЭ путем применения для кумулятивной облицовки наиболее распространенных моделей деформирования материалов.

Для анализа влияния формы облицовки на УВЭ рассматривались кумулятивные облицовки с определенными конструктивными параметрами (рис. 2). Кумулятивная облицовка имеет сферические внутреннюю и наружную поверхности (рис. 2, *а*), характеризуется дегрессивностью — снижением толщины от вершины δ_1 к основанию δ_2 , прогрессивностью — увеличением толщины от вершины к основанию (рис. 2, *б*). У кумулятивной облицовки с комбинированной сфероконической поверхностью (рис. 2, *в*) центральная часть образована

сферическими поверхностями, а периферийная — двумя коническими поверхностями. Такая облицовка характеризуется радиусом перегиба, т. е. переходом сферической части в коническую r_p и толщиной облицовки на периферии δ_3 . Форма облицовки с развитой фаской на наружной поверхности (рис. 2, з) характеризуется толщиной кумулятивной облицовки на периферии δ_4 и радиусом перехода наружной сферической поверхности в коническую фаску r_f .

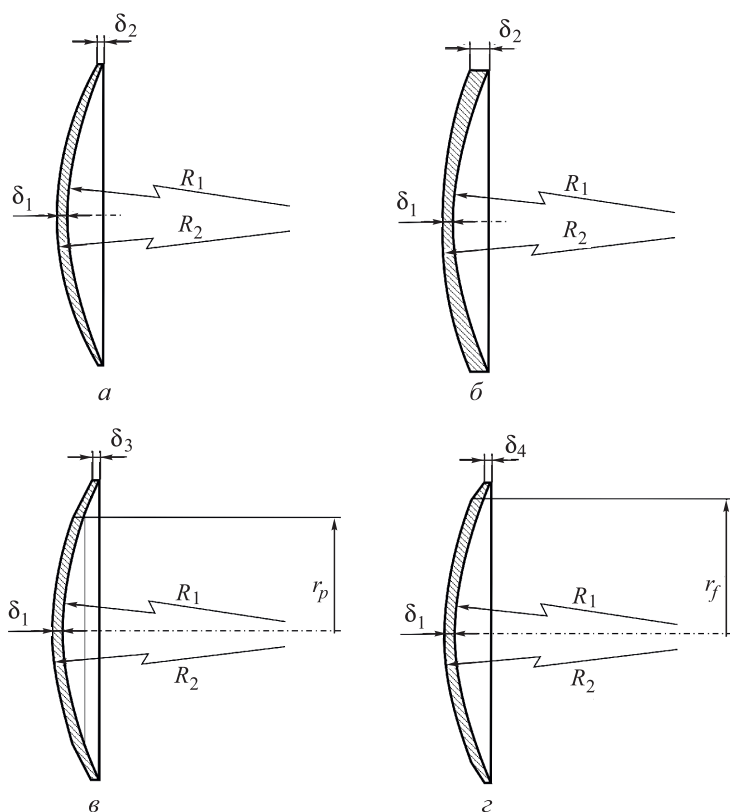


Рис. 2. Варианты облицовок снарядоформирующих зарядов:

a — дегрессивная; *б* — прогрессивная; *в* — сфероконическая; *з* — с конической фаской; радиусы: R_1 — внутренней сферической поверхности; R_2 — наружной сферической поверхности; r_p — перехода сферической поверхности в коническую; r_f — кромки фаски на сферической поверхности; толщина облицовки: δ_1 — в центре; δ_2 — в периферийной области; δ_3 — на торце конической поверхности; δ_4 — на торце фаски

Существенное влияние на формирование УВЭ оказывают физико-механические свойства материала кумулятивной облицовки. Градиентное распределение физико-механических свойств вдоль образующей облицовки и оценка его влияния на деформирование кумулятивной облицовки составляет предмет проведенных исследований. Результаты

вычислительных экспериментов, в которых использовались кумулятивные облицовки с различным динамическим пределом текучести в концентрически расположенных кольцевых зонах представлены на рис. 3.

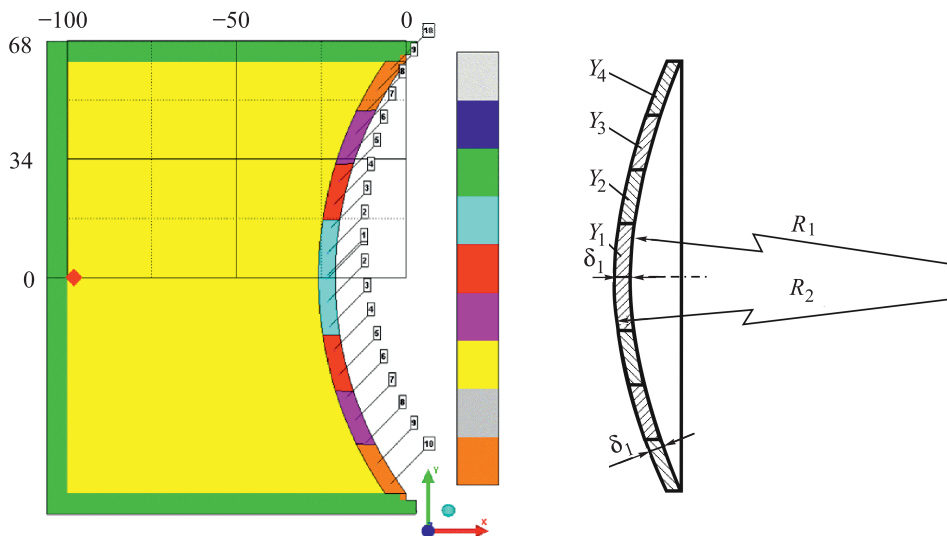


Рис. 3. Кумулятивная облицовка с кольцевыми зонами, которые имеют различные физико-механические свойства; Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 — динамический предел текучести материала в различных зонах (индексы и цвет соответствуют зоне)

Расчеты были проведены для двух модельных СФЗ геометрически подобных типоразмеров, именуемых в дальнейшем СФЗ № 1 и СФЗ № 2.

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

СФЗ № 2. Диаметр заряда взрывчатого вещества $d_3 = 125$ мм, высота $H = 100$ мм, толщина корпуса $d_k = 6$ мм. Диаметр облицовки $d = 31$ мм, прогиб облицовки — 20,88 мм. Так же, как и для СФЗ № 1, использовали облицовки постоянной и переменной толщины. Здесь в первом случае толщина облицовки в центральной и периферийной части 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 оболочки и $\delta_1 = 5,0$ мм, $\delta_2 = 6,3 \dots 8,0$ мм — для облицовок прогрессивной формы.

В обоих зарядах — СФЗ № 1 и СФЗ № 2 использованы материалы со следующими физико-механическими характеристиками [3, 5]:

Облицовка	
сталь	08кп, 11кп, 11ЮА
плотность ρ_0 , г/см ³	7,85
модуль объемного сжатия K_0 , ГПа	175
динамический предел текучести Y , ГПа	0,6...0,9
модуль сдвига G , ГПа	80
откольная прочность σ^* , ГПа	1,65
относительное сужение материала ψ	0,45...0,75
Корпус	
сталь	45Х
взрывчатое вещество	ТГ40
плотность $\rho_{в.в.}$, г/см ³	1,68
скорость детонации $D_{в.в.}$, км/с	7,85
теплота взрывчатого превращения $Q_{в.в.}$, МДж/кг	4,61

Для обоих зарядов применялось одноточечное инициирование.

Физико-механические характеристики материалов облицовки. В связи с тем что физико-механические характеристики материала облицовки оказывают существенное влияние на формирование и разрушение УВЭ, для выбора типового описания поведения материала кумулятивной облицовки были проведены расчеты формы УВЭ по трем моделям напряженно-деформированного состояния [1, 3] и по моделям с различными значениями критерия предельных пластических деформаций [5].

При адекватном описании процесса высокоскоростного деформирования облицовки важен выбор модели напряженно-деформированного состояния материала кумулятивной облицовки. Для описания напряженно-деформированного состояния УВЭ рассмотрены три модели: 1) идеальной сжимаемой упругопластической среды; 2) Джонсона — Кука; 3) Зерилли — Армстронга. Использование этих моделей применительно к моделированию УВЭ описано в работе [3], и проведено сравнение расчетов с экспериментом. В отличие от более простой модели идеальной упругопластической среды, где после достижения материалом предела текучести его прочностные свойства не изменяются, в моделях Джонсона — Кука и Зерилли — Армстронга на этапе пластического деформирования учитываются деформационное упрочнение и температурное разупрочнение.

В частности, были проведены расчеты для СФЗ № 1 с облицовкой постоянной толщины и материалом кумулятивной облицовки с динамическим пределом текучести $Y = 0,70$ ГПа (рис. 4).

В модели идеальной упругопластической среды использован постоянный предел текучести $Y = \text{const}$, в модели Джонсона — Кука изменение предела текучести описано зависимостью

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \varepsilon_p^*][1 - T_*^m],$$

в модели Зерилли — Армстронга

$$Y = Y_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 \ln \varepsilon_p^*) + C_5 \varepsilon_p^\eta,$$

где ε_p , ε_p^* — соответственно интенсивность пластических деформаций и интенсивность скоростей деформаций; $T_* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ — так называемая гомологическая температура; T_m , T , T_0 — соответственно температура плавления, текущая и нормальная ($T_0 \approx 300$ К) температура металла; A , B , C , n , m — эмпирические константы материала модели Джонсона — Кука; C_1 , C_3 , C_4 , C_5 и η — константы материала модели Зерилли — Армстронга.

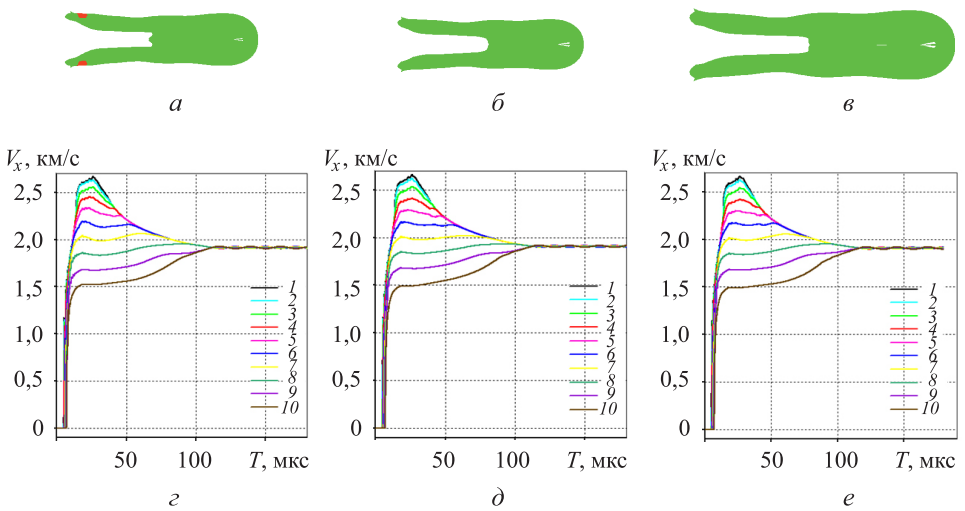


Рис. 4. Форма (а–в) и осевая скорость V_x (з–е) элементов при использовании различных моделей пластичности при $T = 180$ мкс:

а, з — идеальная упругопластическая среда; б, д — модель Джонсона — Кука; в, е — модель Зерилли — Армстронга

В расчетах модели Джонсона — Кука и Зерилли — Армстронга использованы коэффициенты и константы материала соответственно:

Модель Джонсона — Кука

A , ГПа	0,45
B , ГПа	0,275
C	0,022
n	0,36
m	1

Модель Зерилли — Армстронга

C_1	1,033
C_3	0,007
C_4	0,0004
C_5	0,266
η	0,289

В модели идеальной упругопластической среды использован постоянный предел текучести $Y = 0,7$ ГПа, в модели Джонсона — Кука предел текучести $Y_0 = 0,45$ ГПа, а в модели Зерилли — Армстронга $Y_0 = 0,35$ ГПа. Сравнение формы полученных элементов показало, что они отличаются друг от друга по длине на 4,8 % и по диаметру — на 4,2 %. Это свидетельствует о близости механизмов деформирования, отраженных в разных моделях. К тому же скорость УВЭ различных моделей практически одинакова. Температурное, деформационное влияния на предел текучести, согласно моделям Джонсона — Кука и Зерилли — Армстронга, имеют определенное значение, но им (см. рис. 4) можно пренебречь. Поэтому для дальнейших расчетов при описании процесса формирования УВЭ была выбрана наиболее простая модель идеальной сжимаемой упругопластической среды. Кроме того, вследствие схожести полученных результатов уточнены коэффициенты в моделях напряженно-деформированного состояния Джонсона — Кука и Зерилли — Армстронга для стали марки 11ЮА при высокоскоростном деформировании.

В натуральных экспериментах нередко наблюдается разрушение облицовки на этапе полета к цели [7], одним из механизмов которого является наличие большого градиента скорости между головной и хвостовой частью УВЭ, вследствие чего возникают значительные пластические деформации и дефрагментация облицовки. В ходе математического моделирования функционирования СФЗ это явление должно быть учтено при выборе критерия разрушения облицовки, например критерия предельных пластических деформаций [1, 5, 10].

В настоящей статье в качестве критерия разрушения материала был использован критерий Смирнова — Аляева $\varepsilon_i = \varepsilon^*$ (ε_i — интенсивность деформаций; $\varepsilon^* \approx A_\varepsilon \ln \frac{1}{1-\psi}$ — предельная пластическая деформация; $A_\varepsilon = 2$ — коэффициент; ψ — относительное сужение материала [4, 5]) и проведен поиск такого его значения, при котором облицовка сохраняет целостность и не разрушается.

В последующих расчетах использовалась модель СФЗ № 1. Приведем параметры сфероконической облицовки (рис. 5):

Толщина на периферии δ_3 , мм	2,25
Радиус перехода сферической поверхности в коническую r_p , мм	26
Динамический предел текучести Y , ГПа	0,7
Предельная пластическая деформация ε^*	3...4
Относительное сужение материала ψ	0,78...0,85

Анализ полученных результатов расчетов свидетельствует о том, что для данной конфигурации заряда и облицовки при значении критерия пластичности $\varepsilon^* \approx 3$ (рис. 5, а) элемент разрушается (красным цветом показаны зоны разрушенного материала). Это означает, что

применение материалов, у которых критерий пластичности $\varepsilon^* \leq 3$, приведет к разрушению УВЭ. При увеличении критерия пластичности до $\varepsilon^* \approx 3,5$ высокоскоростной элемент становится короче (рис. 5, б) и наружный контур не разрушается, однако внутренняя область элемента будет разрушена, но при этом заполнена дефрагментированным металлом и не утратит способность пробить преграду. Вместе с тем высока вероятность разрушения такого УВЭ из-за тонкой стенки в центральной части элемента. Применение критерия пластичности $\varepsilon^* \approx 4$ показывает (рис. 5, в), что высокоскоростной элемент останется целостным, хотя и будет иметь в центральной части небольшую разрушенную область, тем не менее в радиальном направлении не достигшую наружного контура высокоскоростного элемента.

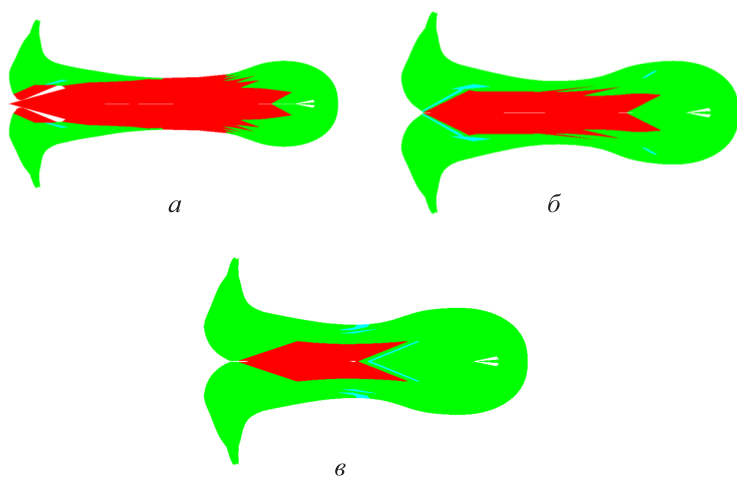


Рис. 5. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента из облицовок с изменением критерия предельных пластических деформаций при $T = 150$ мкс: $\varepsilon^* = 3$ (а); $\varepsilon^* = 3,5$ (б); $\varepsilon^* = 4$ (в)

Таким образом, при выборе материала кумулятивной облицовки рекомендуется использовать марки материалов, характеризующиеся значением критерия пластичности Смирнова — Аляева в диапазоне $\varepsilon^* \approx 3,5 \dots 4,0$. К таким материалам относятся стали марок 08кп, 11кп, 11ЮА, имеющие высокую пластичность.

Формирование удлиненных высокоскоростных элементов. На основе разработанных конструкций зарядов и облицовок, выбранных моделей материалов были проведены расчеты, результаты которых рассмотрим подробнее. Динамика формирования УВЭ при выполнении вычислительного эксперимента для модели СФЗ № 2 с облицовкой постоянной толщины приведена на рис. 6. Сравнивая результаты

полученных расчетов (рис. 6, а) с данными работ [1, 7], в которых использовался аналогичный по размерам заряд с более сложным корпусом (рис. 6, б), а также учитывалось влияние линзового блока (рис. 6, в), следует отметить, что конфигурация корпуса и наличие линзового блока в СФЗ оказывают существенное влияние на конечную форму УВЭ.

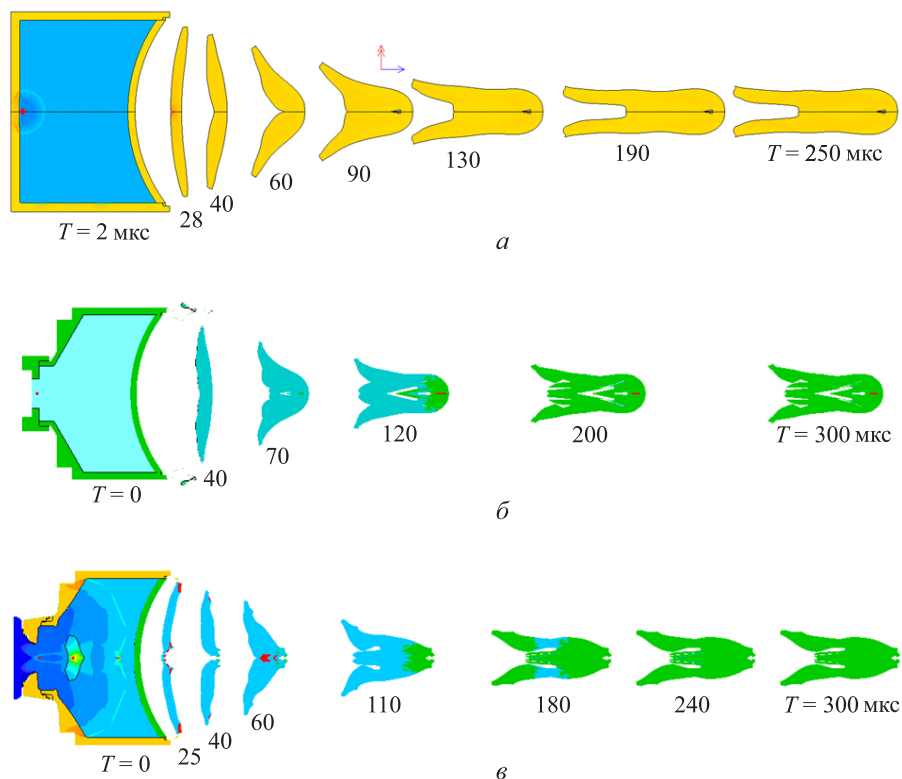


Рис. 6. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента для СФЗ № 2:

а — с цилиндрическим корпусом; б — с цилиндрикоконическим корпусом; в — с цилиндрикоконическим корпусом при наличии линзового блока

Для зарядов с дегрессивными и прогрессивными облицовками (см. рис. 2, а, б) выявлено, что возможно получение УВЭ с удлинением до 4,5 при параметрах облицовки, схематично изображенных на рис. 7. При этом использовался заряд диаметром 62 мм (СФЗ № 1) с кумулятивной облицовкой дегрессивной (рис. 7, а), постоянной (рис. 7, б) и прогрессивной (рис. 7, в) толщины.

При использовании облицовок дегрессивной толщины (см. рис. 7, а) возможно формирование развитой «юбки», но удлинение при этом невелико и не превышает 3,5...4,0. Применение облицовок прогрессивной толщины (см. рис. 7, в) также приводит к увеличению длины высокоскоростного элемента, однако при этом уменьшается

диаметр «юбки», что может привести к потере элементом аэродинамической устойчивости. Кроме того, уменьшается наполненность элемента, что также снижает глубину пробития.

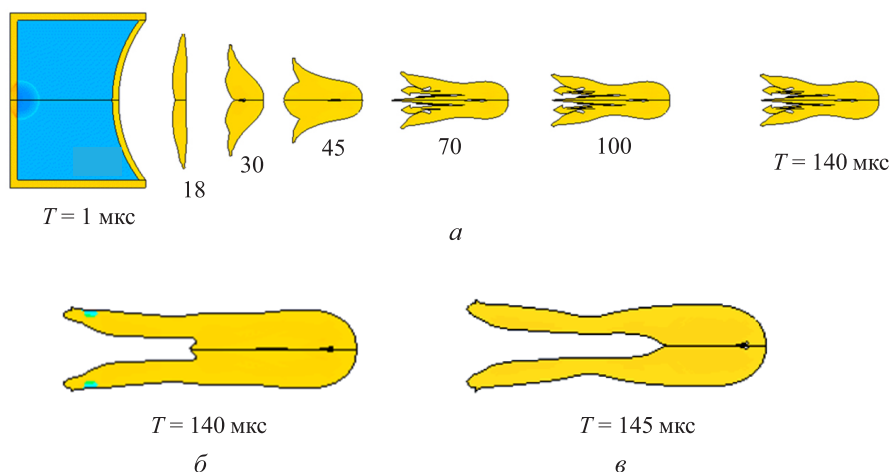


Рис. 7. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента с толщиной облицовки:

a — депрессивной, $\delta_2 = 2,5$ мм, $Y = 0,7$ ГПа; *б* — постоянной, $\delta_2 = 3,1$ мм, $Y = 0,7$ ГПа; *в* — прогрессивной, $\delta_2 = 3,3$ мм, $Y = 0,75$ ГПа

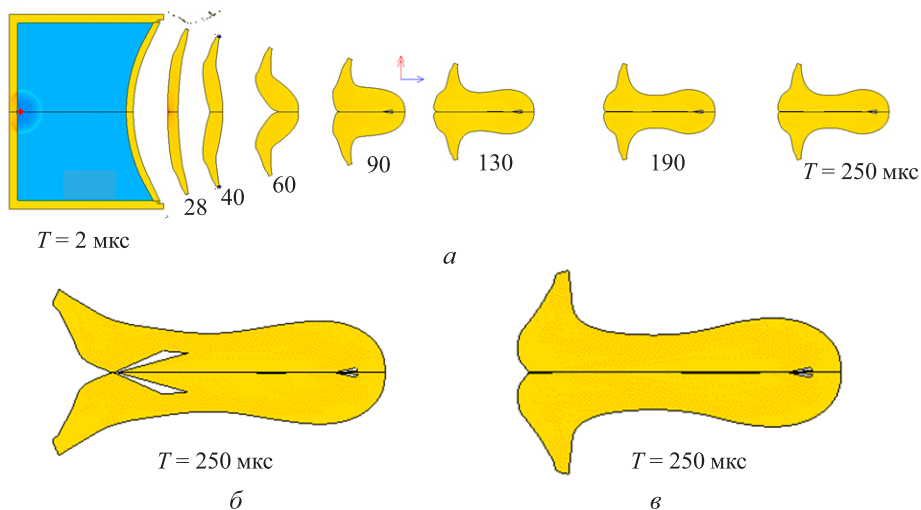


Рис. 8. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента из сфероконических облицовок:

a — $\delta_3 = 4,5$ мм, $r_p = 45$ мм; *б* — $\delta_3 = 5,0$ мм, $r_p = 52$ мм; *в* — $\delta_3 = 4,5$ мм, $r_p = 50$ мм

В расчетах по моделям со сфероконическими облицовками (см. рис. 2, в) использовалась модель (СФЗ № 2) заряда диаметром $d_3 = 125$ мм (рис. 8). При этом динамический предел текучести принят $Y = 0,65$ ГПа.

Использование комбинированных сфероконических облицовок позволяет формировать УВЭ с удлинением более 3 (рис. 8, а, в), имеющих развитую «юбку» различной конфигурации. Наполненность таких элементов выше, чем у УВЭ, сформированных из кумулятивных облицовок переменной толщины, что также должно положительно отразиться на их пробивной способности.

Для полноты картины исследования процессов, сопровождающих формирование УВЭ из облицовок различных форм (см. рис. 2), выполнена серия трехмерных расчетов (рис. 9) зарядов с кумулятивной облицовкой, обладающих развитой конической фаской (см. рис. 2, з). В представленных расчетах была использована модель СФЗ № 1, имеющая следующие геометрические размеры облицовки (см. рис. 9):

	Без фаски		С фаской	
δ_4 , мм	3,1	1,2	1,2	
r_f , мм	31	29	30	

Динамический предел текучести материала кумулятивной облицовки принят $Y = 0,65$ ГПа.

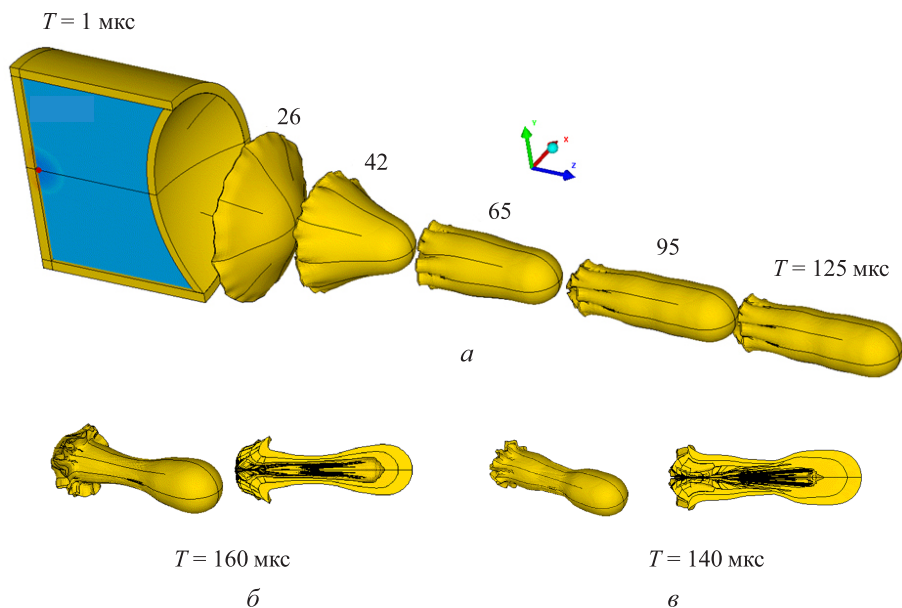


Рис. 9. Динамика формирования удлиненных высокоскоростных элементов из облицовок с развитой конической фаской на наружной поверхности (объяснения в тексте)

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование облицовок с развитой конической фаской на наружной поверхности позволяет сформировать развитую «юбку» в хвостовой части УВЭ. В комплексе с достаточно большим удлинением (до 4,3) и хорошей

наполненностью это позволяет сделать предположение о перспективности такой формы облицовок. Кроме того, в отличие от двумерных расчетов, зафиксировано складкообразование в хвостовой части элемента. В частности, выявлено, что формирование таких складок возможно и у УВЭ, не имеющих выраженной «юбки» (рис. 9, а), а у УВЭ с развитой «юбкой» такие складки менее выражены, но также присутствуют (рис. 9, б, в).

Проведение трехмерных расчетов позволяет высказать идею об управлении подобным складкообразованием с помощью конструктивно-технологических средств, однако это требует дополнительного изучения.

Характер влияния распределения физико-механических свойств материала кумулятивной облицовки на конечные параметры, формируемого взрывом УВЭ, представлен на рис. 10. Для расчетов использовалась схема (см. рис. 3), где облицовка разделена на четыре концентрически расположенные кольцевые зоны, в каждой из которых были изменены физико-механические параметры материала (в частности, динамический предел текучести). Сравним три варианта: 1) без изменения свойств материала кумулятивной облицовки, когда $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_4 = 0,65$ ГПа (рис. 10, а); 2) с увеличением прочностных свойств материала от центра к периферии при $Y_1 = 0,50, Y_2 = 0,65, Y_3 = 0,70, Y_4 = 0,80$ ГПа (рис. 10, б); 3) с уменьшением прочностных свойств от центра к периферии при $Y_1 = 0,80; Y_2 = 0,75; Y_3 = 0,70; Y_4 = 0,65$ ГПа (рис. 10, в).

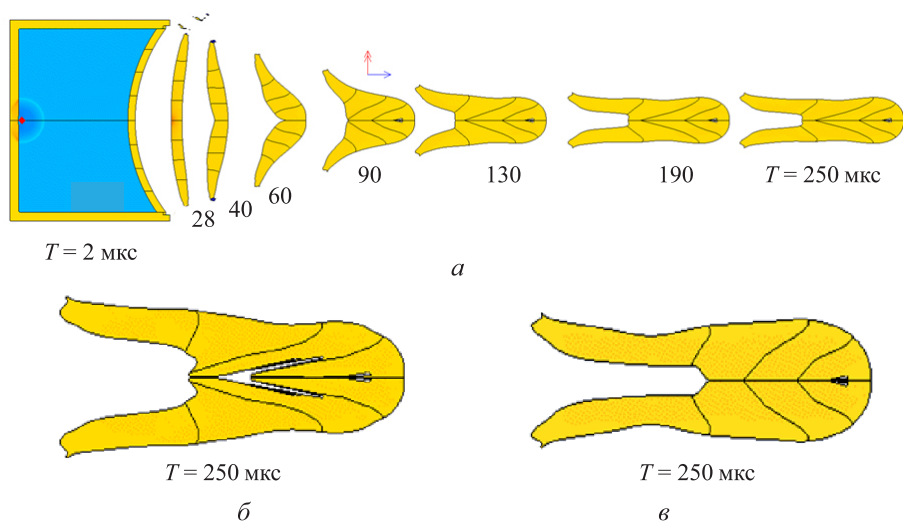


Рис. 10. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента из облицовок с различными физико-механическими свойствами (объяснения в тексте)

Увеличивая динамический предел текучести от центра к периферии (см. рис. 10, б), можно за счет снижения пластичности добиться увеличения «юбки» в хвостовой части. Представлены результаты с невысокой наполненностью УВЭ, хотя, вероятно, используя комбинацию этого заряда с измененной формой облицовки (см., например, рис. 8, в), возможно получить и более наполненные элементы. Данное предположение нуждается в уточнении. При увеличении динамического предела текучести от периферии к центру (см. рис. 10, в), т. е. при обратном порядке расположения зон, особенно заметно формирование «юбки» в хвостовой части, что свидетельствует о возможности управления формой УВЭ путем направленного изменения свойств материала облицовки. Кроме того, постановка и решение задачи с разделением на зоны позволяет определить, каким образом материал из различных зон сегментной облицовки деформируется и впоследствии распределяется по УВЭ. Хвостовая часть УВЭ образуется только из периферийной зоны, а в его центральной части находятся и центральные области облицовки, и близкие к периферии. Этот факт позволяет расширить понимание процессов формирования УВЭ.

В следующей серии расчетов использовалась модель СФЗ № 1, но в каждом из вариантов варьировался динамический предел текучести облицовки $Y = 0,65$ ГПа (рис. 11, а), $Y = 0,70$ ГПа (рис. 11, б), $Y = 0,75$ ГПа (рис. 11, в).

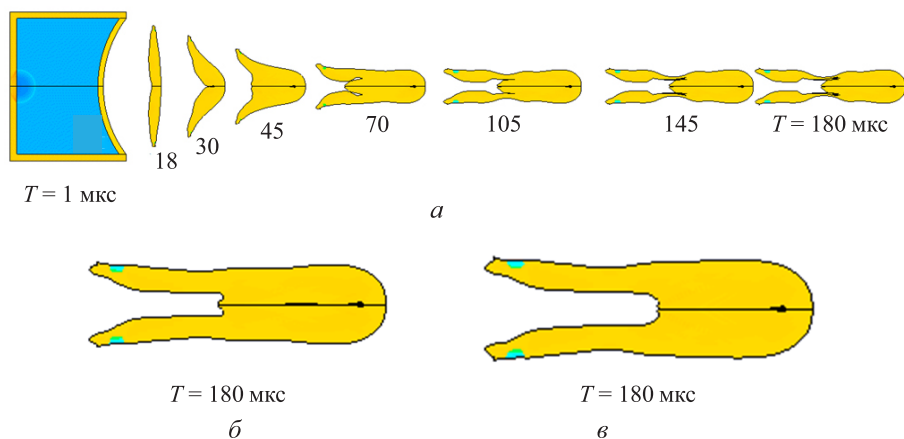


Рис. 11. Динамика формирования удлиненного высокоскоростного элемента из облицовок при различных значениях динамического предела текучести материала (объяснения в тексте)

Удлинение УВЭ с уменьшением предела текучести увеличивается до 4,6, однако возникает риск отрыва головной части от хвостовой (см. рис. 11, а). В то же время при увеличении предела текучести наполненность элемента снижается (см. рис. 11, б, в), что негативно отражается на пробивной способности УВЭ.

Закключение. Обобщая результаты проведенных исследований, необходимо отметить, что наилучшие результаты в плане создания аэродинамически устойчивых УВЭ показали заряды, использующие сфероконические облицовки и облицовки с развитой фаской из пластичных марок стали (08кп, 11кп, 11ЮА). Комбинируя изменение геометрии облицовок в указанных направлениях с рациональным выбором их физико-механических свойств, можно получить надежные аэродинамически устойчивые и достаточно наполненные УВЭ, которые способны обеспечить наибольшее пробитие. Обосновано применение идеальной упругопластической модели материала и критерия предельных пластических деформаций типа Смирнова — Аляева для описания формирования УВЭ при взрывном нагружении кумулятивной облицовки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование*, 2012, № 2, с. 31.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17651009> (дата обращения 10.12.2016).
- [2] Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Шикунов Н.В. Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий. *Оборонная техника*, 2010, № 1–2, с. 82–89.
- [3] Потапов И.В., Колпаков В.И., Шикунов 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.
- [4] Колпаков В.И. Особенности деформирования и разрушения удлиненных поражающих элементов при взрывном нагружении кумулятивных облицовок. *Тр. междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»* (Саров, 14–18 марта 20011 г.). Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2012, с. 532–536.
- [5] Колпаков В.И. Анализ конструктивных особенностей зарядов с низкими сегментными кумулятивными облицовками из танталовых сплавов. *Тр. междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»* (Саров, 23–27 марта 2015 г.). Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2015, с. 288–290.
- [6] 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.
- [7] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, т. 1, 506 с.
- [8] Bender D., Chouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkman E. Explosively Formed Penetrators (EFP) with Canted Fins. *19th International Symposium on Ballistics (Interlaken, Switzerland, 7–11 May, 2001). Proceedings*. In 3 volumes. 2001, vol. 2, pp. 755–762.
- [9] Held M. The Shaped Charge Potential. *20th International Symposium of Ballistics (Orlando, FL, USA, 23–27 September, 2002)*, 2002, vol. 1, pp. 841–843.
- [10] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, т. 2, 656 с.
- [11] 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

- [12] 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.
- [13] Pappu M., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *J. of Material Science*, 2002, no. 37, pp. 233–248.
- [14] 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.
- [15] Hussain G., Nameed A., Netherington 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, 31, vol. 2, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [16] Михалев А.Н., Подласкин А.Б. Исследования перспективных форм действующих ударных ядер. *Изв. РАН*, 2009, № 1 (59), с. 3–9.
- [17] Михалев А.Н. Формируемые взрывом снаряды: аэродинамические свойства и методики формирования (обзор по данным зарубежных работ). *Препр. ФТИ им. А.Ф. Иоффе*, 2004, 1775, 38 с.
- [18] 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. Санкт-Петербург*, 2011, т. 1, с. 100–108.
- [19] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Возможность компьютерного моделирования функционирования снарядоформирующих зарядов с алюминизованными взрывчатыми веществами при разработке прототипов боеприпасов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 2, с. 108–126.
- [20] 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.
- [21] 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/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>.

Статья поступила в редакцию 22.11.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>

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: kpvl7@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

Mechanism of explosive formation of high-velocity elongated projectiles from steel segment lining

© P.V. Kruglov, V.I. Kolpakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study focuses on the results of mathematical simulation of the explosively formed projectiles done with numerical methods of continuum mechanics. In this paper we consider some options for improving the projectiles efficacy and describe the results of computational experiments with various design parameters of the steel segment lining. Mathematical models of projectiles of two standard sizes were studied in two-dimensional and three-dimensional formulations. Findings of the research show that the best characteristics of the high-velocity elongated projectiles can be obtained by using the spherical-conic lining and the lining with a developed chamfer. The models with different physical and mechanical properties of the lining, in particular, demonstrate the mechanism of projectile forming from the lining with radial gradient ductility. The study substantiates the application of the elastoplastic deformation model and the failure criterion in the form of the Smirnov—Alyaev criterion.

Keywords: *explosively formed projectiles, numerical simulation, high-velocity elongated projectiles*

REFERENCES

- [1] Kolpakov V.I. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2, pp. 31. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/334177.html> (accessed December 10, 2016).
- [2] Kolpakov V.I., Bascacov V.D., Shikunov N.V. *Oboronnaya tekhnika — Enginery*, 2010, no. 1–2. pp. 82–89.
- [3] 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*. Saint-Petersburg – Novgorod (Russia), 2010, pp. 184–188.
- [4] 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. 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.
- [5] 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. “XVII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye sostoyaniya veschestva. Detonatsiya. Udarnye volny” (Sarov, 23–27 marta 2015 g.)* [Proc. 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.

- [6] Kolpakov V.I., Goryunov V.V. *Oboronnaya tekhnika — Enginery*, 2011, no. 2–3, pp. 30–34.
- [7] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy. V 2 tomakh. Tom 1* [Ammunition. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [8] Bender D., Chouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkmann E. Explosively Formed Penetrators (EFP) with Canted Fins. *19th International Symposium on Ballistics (Interlaken, Switzerland, 7–11 May, 2001). Proc. in 3 vols.* 2001, vol. 2, pp. 755–762.
- [9] Held M. The Shaped Charge Potential. *20th International Symposium of Ballistics (Orlando, FL, USA, 23–27 September, 2002)*. 2002, vol. 1, pp. 841–843.
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanaullah K. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 13–24.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0021894413010021>
- [13] Pappu M., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *Journal of Materials Science*, 2002, no. 37, pp. 233–248.
- [14] 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.
- [15] 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, 31, vol. 2, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [16] Mikhalev A.N., Podlaskin A.B. *Izvestiya RAN — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 1(59), pp. 3–9.
- [17] Mikhalev A.N. Formirovaniye vzryvom snaryady: aerodinamicheskie svoystva i metodiki formirovaniya (obzor po dannym zarubezhnykh rabot) [Explosively formed projectiles: aerodynamic properties and methods of formation (a review of the foreign works data)]. *Preprint of the Ioffe Institute*, 2004, 1775, 38 p.
- [18] 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: a collect. proc. all-Russ. sc. and tech. conf.]. St. Petersburg, 2011, vol. 1, pp. 100–108.
- [19] 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.
- [20] Sokolov S.S., Sadovoy A.A., Chayka T.I. *VANT, ser. Matematicheskoe modelirovaniye fizicheskikh protsessov — Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki (VANT), series Mathematical Modeling of Physical Processes*, 2004, no. 3, pp. 54–61.
- [21] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 9. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>

Kruglov P.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of special 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 research publications in the field of numerical simulation of dynamic processes.

e-mail: kolpakov54@mail.ru