

УДК 531.5; 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ МИШЕНИ МНОЖЕСТВЕННЫМИ УДАРНИКАМИ, ФОРМИРУЕМЫМИ ВЗРЫВОМ

Х. Сун^{*,**}, Ч. Ли^{**}, Ю. Ся^{*}, Ц. Ван^{***}, Я. Чжан^{**}

* Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, Китай

** Китайский северный научно-исследовательский институт машиностроения,
100072 Пекин, Китай

*** Нанкинский научно-технический университет, 210094 Нанкин, Китай
E-mails: 13691264732@139.com, chmli@noveri.com.cn, xia-yuanqing@bit.edu.cn,
wjx@njust.edu.cn, zyninger@163.com

С использованием пакета LS-DYNA, предназначенного для решения связанных трехмерных задач гидродинамики, исследуются факторы, влияющие на геометрию, скорость и распределение в пространстве множественных ударников, формируемых взрывом. Выполнено экспериментальное исследование трех типов конструкции, предназначенной для формирования взрывом множественных ударников. Установлено, что в результате взрыва из лайнеров дугообразной формы с непостоянной толщиной формируются ударники с большим отношением длины к диаметру. Танталовые и медные ударники обладают хорошей пробивной способностью, что обусловлено большими значениями отношения длины к диаметру и кинетической энергии. Показано, что при использовании дугообразных облицовок и расположении лайнеров на одном и том же расстоянии друг от друга плотность и равномерность распределения ударников на мишени увеличиваются.

Ключевые слова: формируемые взрывом множественные ударники, эффективность проникания, однородность распределения.

DOI: 10.15372/PMTF20200204

Введение. Исследования эффективности поражения мишени формируемыми взрывом ударниками (ФВУ) необходимы для совершенствования военной техники [1, 2]. Проведены многочисленные исследования характеристик ФВУ [3–7]. В работе [4] приведены результаты исследований факторов, влияющих на формирование ФВУ. В [5] предложена модель, позволяющая исследовать характеристики ФВУ. В [6, 7] исследовано влияние многоточечного инициирования на ФВУ и их пробивную способность. Устойчивость полета ФВУ со звездообразным хвостовым оперением изучена в работах [8, 9]. В [10] исследована пробивная способность ФВУ. В [11] численно и экспериментально изучены характеристики полета ФВУ и их пробивная способность. ФВУ с оперением и характеристики их полета исследованы в работе [12]. В [13] предложена технология создания хвостовой юбки у снарядов, формируемых взрывом.

С целью достижения хорошей пробивной способности ФВУ мишени, находящейся на большом расстоянии от снаряда, и эффективного разрушения ее в работах [14, 15] изучались множественные ФВУ. Актуальным является исследование факторов, влияющих на пробивную способность множественных ФВУ и плотность их распределения при попадании в мишень, т. е. факторов, обеспечивающих эффективное разрушение мишени.

Целью данной работы является исследование конструкции, предназначенной для формирования взрывом множественных ударников и обеспечивающей высокую эффективность проникания их в мишень и равномерное распределение в ней [16, 17].

Исследуется влияние геометрии и материала лайнера на характеристики множественных ФВУ. Рассмотрены конструкции трех типов, предназначенные для создания множественных ФВУ.

1. Геометрия и скорость формируемых взрывом ударников. Из результатов ранее выполненных исследований следует, что пробивная способность ФВУ зависит от материала и геометрии лайнера, количества точек инициирования, способа инициирования цепи подрыва, характеристик заряда и облицовки и т. д. [6–9, 14, 18]. Ниже с использованием численного моделирования исследуется влияние материала и геометрии лайнера на характеристики множественных ударников.

На рис. 1 представлена схема модели, использованной при численном моделировании (δ — толщина облицовки, α , β — внутренний и внешний углы при вершине облицовки соответственно, d , H — диаметр и высота заряда соответственно). Исследовались лайнеры трех типов: конусообразные постоянной толщины, дугообразные постоянной толщины и дугообразные переменной толщины. В качестве материала заряда использовался динамит марки 8701 с плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$. При $H/d > 1,5$ увеличение высоты заряда не приводит к существенному увеличению скорости ФВУ [19], поэтому в данной работе использовались заряды с размерами $d = 60 \text{ мм}$, $H = 90 \text{ мм}$. Точка инициирования находилась в центре основания заряда.

Численное моделирование проводилось с использованием пакета программ LS-DYNA, предназначенного для решения связанных задач гидродинамики. При моделировании взаимодействия лайнера и мишени, изготовленной из стали марки #45, учитывалось разрушение поверхности контакта. При моделировании движения лайнера и оболочки заряда применялся метод Лагранжа, динамита — метод Эйлера, воздуха — метод Лагранжа — Эйлера. При моделировании свойств материалов лайнера, оболочки и мишени использовались модель материала Джонсона — Кука и уравнение состояния Грюнайзена, свойств

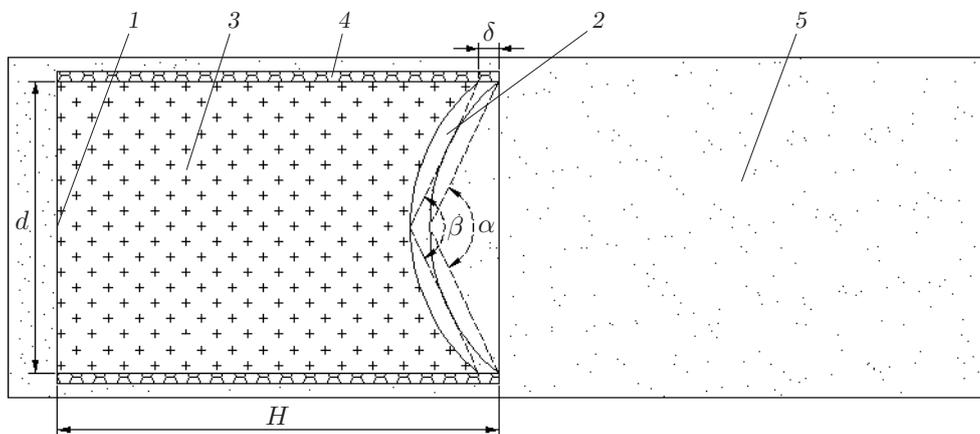


Рис. 1. Схема заряда, использованная при численном моделировании:

1 — точка инициирования детонации, 2 — облицовка, 3 — заряд, 4 — оболочка, 5 — воздух

Таблица 1

Конфигурация ударников, формируемых взрывом

Углы при вершине облицовки		Конусообразная облицовка	Ударник	Дугообразная облицовка	Ударник
α , град	β , град				
130	130				
140	140				
150	150				
130	135	—	—		

динамита — модель взрывного горения материала и уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли, движение воздуха моделировалось с помощью нуль-модели материала и уравнения состояния Грюнайзена. Параметры задачи, используемые при численном моделировании, приведены в работах [4, 14, 20].

1.1. *Влияние геометрии лайнера на геометрию формируемых взрывом ударников.* В работе [1] показано, что геометрия ФВУ зависит, главным образом, от величины углов при вершине облицовки и ее толщины. Как правило, при использовании лайнеров переменной толщины ФВУ имеют форму длинных стержней. В случае лайнеров постоянной толщины формируются ударники с небольшим отношением длины L к диаметру D . Если углы при вершине облицовки уменьшаются со 150 до 130° , то отношение L/D для ударников увеличивается. Параметры лайнеров, использованные при исследовании влияния их геометрии на геометрию ФВУ, приведены в табл. 1. Для лайнеров с углами при вершине облицовки, принадлежащими интервалу от 130 до 150° , меньшим углам соответствуют ударники с большим отношением L/D . При использовании лайнеров дугообразной формы формируются ударники с большим отношением L/D , чем при использовании лайнеров конусообразной формы. В случае применения лайнеров дугообразной формы с углом при вершине облицовки, близким к 130° , образуются ударники, имеющие форму длинных стержней. При использовании лайнеров дугообразной формы с углами при вершине облицовки $\alpha = 130^\circ$ и $\beta = 135^\circ$ формируются ударники с большим отношением длины к диаметру ($L/D \approx 16,6$).

1.2. *Влияние материала лайнера на геометрию ФВУ и на эффективность их проникания в преграду.* Исследовались изготовленные из вольфрама, меди и тантала лайнеры дугообразной формы с углами при вершине облицовки $\alpha = 130^\circ$, $\beta = 135^\circ$. Для того чтобы уменьшить время вычислений при моделировании процесса проникания ударников в стальную мишень, использовались ударники упрощенной формы. В табл. 2 приведены

Таблица 2

Характеристики ударников, использованные при численном моделировании, и ударников упрощенной формы

Материал	Геометрия ударника	m , г	L , см	R , см	L/D	V , м/с	E , кДж
Медь	Геометрия 1	58,9	10,8	0,38 ÷ 0,52	10,6 ÷ 14,2	2140	134,8
	Геометрия 2	59,0	10,8	0,50	11,5	2140	135,0
Тантал	Геометрия 1	109,6	14,8	0,20 ÷ 0,40	18,5 ÷ 37,0	1300	92,6
	Геометрия 2	111,5	14,8	0,40	19,5	1300	94,2
Вольфрам	Геометрия 1	116,1	8,6	0,45 ÷ 0,65	6,6 ÷ 9,5	1240	89,2
	Геометрия 2	116,0	8,5	0,50	8,2	1240	90,3

Таблица 3

Геометрия ударников и глубина их проникания в преграду для лайнеров из различных материалов

Материал	Геометрия ударника		Характер проникания	h , см	r , см	v , см ³
	Геометрия 1	Геометрия 2				
Медь				8,6	0,76 ÷ 1,30	29,6
Тантал				12,8	0,83 ÷ 1,03	34,8
Вольфрам				11,7	0,75 ÷ 1,10	31,2

параметры ударников, полученные при численном моделировании (геометрия 1), и параметры упрощенных ударников (геометрия 2). Результаты численного моделирования процесса проникания ударников в мишень представлены в табл. 3 (h — глубина проникания ударника, r — радиус кратера, v — объем кратера).

Из результатов анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что для ударников из тантала $L/D = 19,5$. Это значение приблизительно в два раза больше отношения L/D для ударников из меди и в 2,5 раза больше значения L/D для ударников из вольфрама. Скорость V ударников из тантала, меди и вольфрама равна 2140, 1300 и 1240 м/с соответственно, кинетическая энергия $E = 135,0; 94,2; 90,3$ кДж соответственно. Наибольшую эффективность пробития мишени имеют ФВУ из тантала вследствие большого значения отношения L/D . Эффективность пробития мишени медными ударниками также высока, что обусловлено большими значениями кинетической энергии и отношения L/D .

Таблица 4

Геометрия лайнеров и облицовок

Тип конструкции	Число лайнеров	Геометрия одного лайнера			Расположение лайнеров в облицовке
		R , мм	δ , мм	Форма	
I	17	9,0	2,875		
II	19	9,0	2,875		
III	37	7,5	3,000		

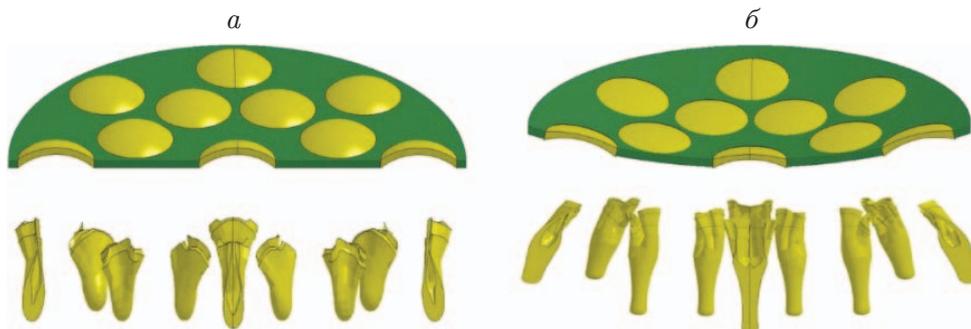


Рис. 2. Геометрия множественных ФВУ, соответствующая конструкциям типа I (а) и типа II (б)

2. Характер распределения в пространстве ФВУ. Для обеспечения эффективного пробития мишени и ее разрушения плотность распределения ударников в пространстве должна быть равномерной и достаточно большой. Из результатов проведенных ранее исследований следует, что распределение в пространстве ФВУ зависит от параметров заряда, способа инициирования взрыва и других факторов [21, 22].

При изучении влияния способа крепления лайнера и его геометрии на характер распределения ударников в пространстве рассматривались конструкции трех типов. Конструкция первого типа представляла собой 17 медных лайнеров, закрепленных в конусообразной облицовке, конструкции второго и третьего типов — соответственно 19 и 37 медных лайнеров, закрепленных в дугообразной облицовке. Рассматривались лайнеры непостоянной толщины ($\delta = 2 \div 3$ мм) с внутренним и внешним углами при вершине облицовки, равными 130 и 135° соответственно. Параметры лайнеров и облицовок и их начальное положение приведены в табл. 4.

На рис. 2 показаны начальное положение лайнеров, способ их крепления и распределение в облицовке. Угол отклонения ФВУ определим как угол между осью боеголовки и

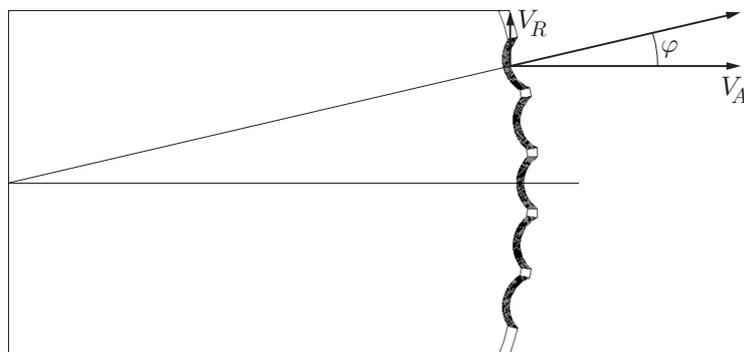


Рис. 3. Схема вычисления угла отклонения

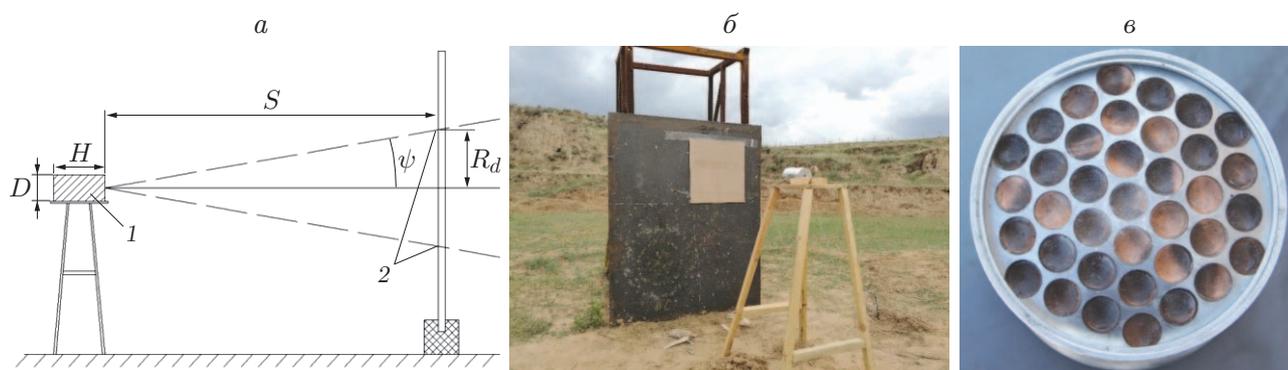


Рис. 4. Схема эксперимента (а), экспериментальная установка (б) и положение лайнеров (в):

1 — множественные ударники, 2 — мишень

направлением полета ударника (рис. 3):

$$\operatorname{tg} \varphi = V_R / V_A$$

(V_R , V_A — радиальная и осевая скорости ударника соответственно).

Из рис. 2 следует, что для рассмотренных облицовок двух типов существенного различия в распределении скоростей ударников не наблюдается. В случае плоской облицовки скорость ударников изменяется от 1294 м/с (для ударников, закрепленных в центре облицовки) до 1129 м/с (для ударников, закрепленных вблизи оболочки заряда), в то время как в случае дугообразной облицовки — от 1325 до 1102 м/с. В случае плоской облицовки угол рассеивания ударников равен $\psi = 8,2^\circ$, в случае дугообразной облицовки $\psi = 13,7^\circ$.

Положение лайнеров в облицовке также влияет на их распределение в пространстве. В первой строке табл. 4 показаны лайнеры, расположенные вдоль окружностей, во второй и третьей строках — лайнеры, расположенные на одном и том же расстоянии друг от друга. В случае расположения лайнеров на одном и том же расстоянии друг от друга распределение ударников является более однородным, чем в случае их расположения вдоль окружностей.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. В экспериментах исследовались эффективность поражения мишени множественными ударниками, формируемыми взрывом, а также характеристики их распределения в пространстве. Изучались три варианта расположения лайнеров в дугообразной облицовке (см. табл. 4). На рис. 4 показаны схема эксперимента, экспериментальная установка и положение лайнеров, соответствующее данным, приведенным в третьей строке табл. 4. Мишень, представлявшая собой стальную

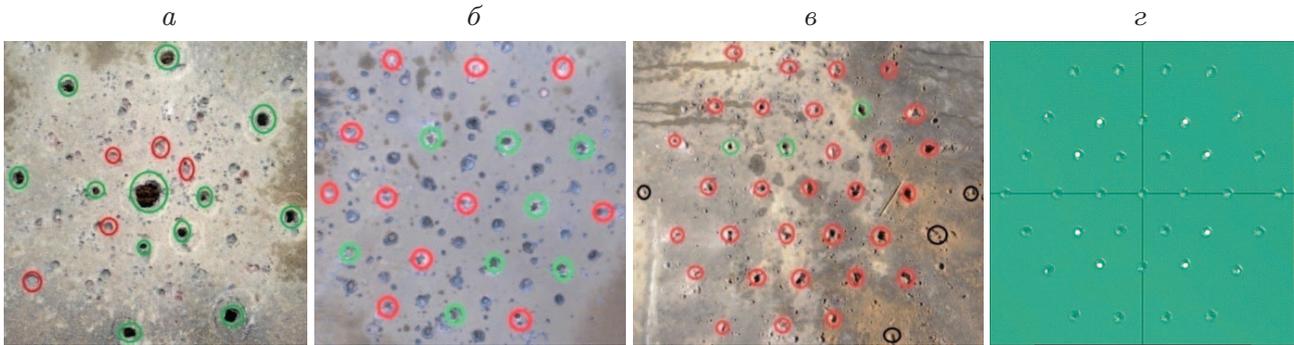


Рис. 5. Мишени, пораженные ударниками:
a-v — результаты экспериментов для трех типов расположения ударников (*a* — тип I, *б* — тип II, *в* — тип III), *z* — результаты моделирования, соответствующие расположению ударников типа III

Таблица 5

Значения угла рассеивания лайнеров

Тип конструкции	Число лайнеров	ψ , град		Δ , %
		Численное моделирование	Эксперимент	
I	17	18,7	19,2	-2,6
II	19	18,5	17,8	3,9
III	37	18,8	18,5	1,6

пластину (сталь марки #616) толщиной 12 мм, находилась на расстоянии от боеголовки $S = 1,9$ м. После завершения эксперимента измерялись глубина и диаметр образовавшихся в мишени кратеров, а также радиус R_d области, по которой распределились ударники. С использованием экспериментальных данных вычислялся угол рассеивания

$$\psi = \arctg(R_d/S).$$

На рис. 5 показаны мишени, пораженные ударниками. В эксперименте три ударника проникли в преграду, глубина образовавшихся при этом кратеров составляла $h = 9,7 \div 11,8$ мм. При численном моделировании 12 ударников проникли в преграду, глубина образовавшихся кратеров составляла $h = 10,3 \div 11,7$ мм. Распределения ударников типа III, полученные в эксперименте и при численном моделировании, практически совпадают. Углы рассеивания ψ , полученные в эксперименте и при численном моделировании, приведены в табл. 5 (Δ — погрешность). Для трех рассмотренных вариантов расположения ударников экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Распределение по мишени ударников типа I является неравномерным, в то время как распределения ударников типа II, III равномерные. Большинство проникших в преграду ударников типа I имели большую массу и большую кинетическую энергию. Кинетическая энергия практически половины ударников типа II, проникших в преграду, была небольшой.

В табл. 6 приведены характеристики сформированных взрывом совокупностей ударников, состоящих из 7, 19 и 37 ударников, расположенных на одном и том же расстоянии друг от друга на дугообразной облицовке. С увеличением числа лайнеров их масса и кинетическая энергия, а следовательно, и пробивная способность уменьшаются, что согласуется с экспериментальными данными.

Таблица 6

Характеристики проникания лайнеров различных размеров

Число лайнеров	Форма лайнера	R , мм	δ , мм	m , г	V , м/с	E , кДж	h , мм
7		15,0	2,875	15,50	1586	19,50	13,5
19		9,0	2,875	6,13	2046	12,83	12,2
37		7,5	3,000	3,74	2140	8,64	11,7

Заключение. В результате численного моделирования установлено, что если углы при вершине облицовки находятся в интервале от 130 до 150° , то при меньших углах формируются ударники с большим отношением длины к диаметру и небольшой юбкой. Из лайнеров переменной толщины, расположенных в дугообразной облицовке, формируются ударники с большим отношением длины к диаметру по сравнению с ударниками, формируемыми из лайнеров, расположенных в конусообразной облицовке.

Танталовые ударники более эффективно пробивают мишень, поскольку вследствие высокой пластичности тантала такие ударники имеют большое отношение длины к диаметру. Эффективность пробития мишени медными ударниками также достаточно большая, поскольку они имеют большую кинетическую энергию и большое отношение длины к диаметру.

Дугообразные облицовки имеют преимущество по сравнению с плоскими облицовками, так как ударники, сформированные из лайнеров, закрепленных в облицовках дугообразной формы, более плотно распределены в пространстве. Расположение лайнеров на одном и том же расстоянии друг от друга является более предпочтительным по сравнению с расположением их вдоль концентрических окружностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yi J.** Technology of multi-explosively formed projectile warhead. Beijing: Nat. Defence Inc., 2012.
2. **Trishin Yu. A.** Physics of cumulative processes. Novosibirsk: Inst. of Hydrodynamics Sib. Div. Russ. Acad. of Sci., 2005. [in Russian].
3. **Fomin V. M.** High-velocity interaction of bodies / V. M. Fomin, A. I. Gulidov, G. A. Sapozhnikov, et al. Novosibirsk: Izd. Sib. Div. Russ. Acad. of Sci., 1999. [in Russian].
4. **Hussain G., Hameed A., Hetherington J. G.** Analytical performance study of explosively formed projectiles // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2013. V. 54, N 1. P. 10–20.
5. **Carsodo D., Teixeira-Dias F.** Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP) // Intern. J. Impact Engng. 2016. V. 93. P. 116–127.
6. **Li W., Wang X., Li W.** The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator // Intern. J. Impact Engng. 2010. V. 37. P. 414–424.
7. **Bouet T. H., Tarayre P., Guillon J. P.** Study of a multi-point ignition EFP // Proc. of the 15th Intern. symp. on ballistics, Jerusalem (Israel), 5–9 May 1995. S. 1., 1995. V. 2. P. 159–166.
8. **Yu C., Dong Q. D., Sun C. W., et al.** The experimental studies of explosively formed projectile with star shaped tail // Explosion Shock Waves. 2003. V. 23. P. 561–564.

9. **Weimann K.** Flight stability of EFP with star shaped tail // Proc. of the 14th Intern. symp. on ballistics, Quebec (Canada), 15–18 May 1993. Arlington: ADPA, 1993. V. 1. P. 755–764.
10. **Weickert C. A., Gallagher P. J.** Penetration of explosively formed projectiles // Intern. J. Impact Engng. 1993. V. 14. P. 809–818.
11. **Wu J., Liu J., Du Y.** Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile // Intern. J. Impact Engng. 2007. V. 34. P. 1147–1162.
12. **Liu J.-Q., Gu W.-B., Lu M., et al.** Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics // Defence Technol. 2014. V. 10. P. 119–123.
13. **Li W., Wang X., Li W., Chen K.** Research on the skirt tail explosively formed projectile stable shaping technology // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2016. V. 57, N 5. P. 894–899.
14. **Blache A., Weimann K.** Multi-EFP-charge for light weight armor defeat // Proc. of the 18th Intern. symp. on ballistics, San Antonio (USA), 5–9 May 1999. Lancaster: Technomic Publ. Co, 1999. V. 1. P. 419–425.
15. **Fong R., Ng W., Rice B., et al.** Multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead technology development // Proc. of the 19th Intern. symp. on ballistics, Interlaken (Switzerland), 7–11 May 2001. Interlaken: S. n., 2001.
16. **Ng W.** Long standoff demolition warheads for armor, masonry and concrete targets // Mines, demolition and non-lethal conference, Amsterdam (Netherlands), 4 June 2002. S. l., 2002. P. 163–183.
17. **Zhou X., Long Y., Yu D., et al.** Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP // Acta Armamentarii. 2006. V. 27. P. 23–26.
18. **Wang M., Huang D., Luo R.** Experiment and numerical simulation of integral multi-explosively formed warhead // Acta Armamentarii. 2010. V. 31. P. 453–457.
19. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of the 7th Intern. symp. on ballistics, Hague (Netherlands), 29 Apr. — 3 May 1983. S. l., 1983. P. 541–547.
20. **Li W., Li W., Wang X., et al.** Effect of the liner material on the shape of dual mode penetrators // Combust. Explos. Shock Waves. 2015. V. 51. P. 387–394.
21. **Zhao C., Ran D., Liu K., et al.** Effect of charge parameters on formation of integral explosively formed projectiles // Chinese J. Energetic Materials. 2017. V. 25. P. 882–887.
22. **Zhao C., Long Y., Sui Y., et al.** Influence of initiation methods on formation of integral MEFP warhead parameter // J. PLA Univ. Sci. Technol. 2012. V. 13. P. 559–564.

*Поступила в редакцию 22/V 2019 г.,
после доработки — 1/X 2019 г.
Принята к публикации 28/X 2019 г.*
