

## Математическое моделирование

УДК 534.222.2

### РАСЧЁТ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ И ТОРЦЕВОМ МЕТАНИЯХ МЕТАЛЛА

*И. И. Реут, А. Л. Кривченко*

Самарский государственный технический университет,  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: enterfax@mail.ru, snex@rambler.ru

*Предложены методики расчета относительной скорости торцевого метания медной пластины методом эквивалентных масс и скорости расширения медной цилиндрической оболочки. Результаты вычислений сопоставлены с экспериментальными данными. Среднеквадратическая ошибка составила менее 3,5%.*

**Ключевые слова:** метательная способность, торцевое метание, цилиндрическое расширение оболочки.

**Введение.** Сложные динамические взаимодействия представляют самостоятельный интерес для различных областей науки и техники, в том числе и для разработки новых систем динамического оружия. Существенное место среди кумулятивных зарядов занимают так называемые снарядоформирующие заряды, формирующие высокоскоростные компактные или удлинённые поражающие элементы, называемые также ударными ядрами.

В настоящее время не существует теоретических методов оценки эффективности действия сплавов для облицовки боеприпасов типа «ударное ядро». Подбор материалов ограничен экспериментальными данными в основном по меди и стали.

В отличие от таких параметров, как скорость детонации и давление продуктов взрыва за фронтом, величина метательной способности не имеет абсолютного значения, а является относительной характеристикой в выбранном виде испытания. Удобно метательную способность выражать в относительных единицах. Относительная метательная способность, как правило, определяется по некоторому эталону взрывчатого вещества (ВВ) и выражается в процентах по отношению к соответствующей характеристике эталона.

**Расчёт относительной скорости торцевого метания на основе модели детонационной оптики.** В общем виде [1] скорость разгона пластины (метаемого элемента)  $W = 2U$ , где  $U$  — массовая скорость продуктов детонации. Это выражение, полученное методом отражения, можно заменить соотношением для эквивалентных масс метаемой пластины и заряда. При этом оценка скорости метаемой пластины по методу торцевого метания требует знания активной массы ВВ [2].

Нами предложен метод эквивалентных масс, в котором энергетика ВВ, участвующего в разгоне пластины, сопоставляется с метаемым элементом в соотношении 1:1. В качестве критерия принимается эквивалентное взаимодействие ВВ с метаемым элементом.

Известно [3], что при постоянной высоте ВВ его энергия  $E$ , участвующая в ме-

---

*Реут Игорь Игоревич*, аспирант, каф. защиты в чрезвычайных ситуациях. *Кривченко Александр Львович* (д.т.н., доцент), профессор, каф. защиты в чрезвычайных ситуациях.

тании, определяется соотношением

$$E = m_0 U^2,$$

где  $m_0 = \pi r_0^2 h_0 \rho_0 / 3$ , — активная масса ВВ, участвующая в разгоне пластины и занимающая объём конуса с радиусом основания  $r_0$  и высотой  $h_0$  [2];  $\rho_0$  — плотность заряда ВВ. При этом метаемая круглая пластина радиуса  $r_{пл}$  с толщиной  $h_{пл}$ , имеющая массу  $m_{пл} = \pi r_{пл}^2 h_{пл} \rho_{пл}$  ( $\rho_{пл}$  — плотность метаемой пластины), получает энергию

$$E_{пл} = \frac{m_{пл} W^2}{2}.$$

Приравнивая  $E$  и  $E_{пл}$  и учитывая, что  $r_0 = r_{пл}$ , получим

$$\frac{W^2}{U^2} = \frac{2}{3} \frac{h_0 \rho_0}{h_{пл} \rho_{пл}},$$

т. е. скорость метания при эквивалентных массах заряда и пластины определяется из выражения

$$W_{экр} = U \sqrt{\frac{2}{3} \frac{h_0 \rho_0}{h_{пл} \rho_{пл}}}. \quad (1)$$

В случае неэквивалентного метания, когда масса пластины больше или меньше массы заряда, скорость метания соответственно изменится. Данный метод может быть предложен как наиболее удобный и обобщённый.

По разработанному методу эквивалентных масс можно рассчитать относительную метательную способность некоторых ВВ и сопоставить с экспериментальными данными торцевого метания. В табл. 1 представлены экспериментальные и расчётные данные относительной скорости метания медной пластины ( $\rho_{пл} = 8,93 \text{ г/см}^3$ )

Таблица 1

Данные относительной скорости метания по методике М-60

ВВ	$\rho_0, \text{ г/см}^3$	$W_{экрп}, \%$	$W_{экрв}, \%$	% ош.
Октоген	1,87	100,0	100,0	—
Гексоген	1,76	97,0	94,4	-2,7
ТНТ	1,57	76,0	73,2	-3,7
Бис-(фтординитроэтил)-нитрамин	1,87	93,7	98,0	+4,6
Бис-(хлординитроэтил)-нитрамин	1,88	90,3	95,1	+5,3
1,4-динитропиперазин	1,58	77,2	71,4	-4,5
2',2',2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутират	1,75	93,3	97,1	+4,1
Бис-(тринитроэтил)-формаль	1,65	87,7	91,1	+3,9
ТЭН	1,74	93,7	97,7	+4,2
ГНБ	1,97	109,7	115,8	+5,6
ТНБ	1,64	79,4	80,0	+0,7
ТАТБ	1,85	82,5	78,8	-4,5
Тетрил	1,71	85,7	86,1	+0,5
Гексанитростильбен	1,64	79,0	79,1	+0,1
3,3'-динитро-4,4'-азоксифуразан	1,63	77,0	76,6	-0,5
3,3'-динитро-4,4'-азоксифуразан	1,79	101,7	107,1	+5,3
Динитро-фуросанил	1,92	109,0	111,2	+2,0
3,3'-диамино-4,4'-азоксифуразан	1,72	96,9	96,0	-1,0
Бензотрифуроксан	1,88	101,5	104,3	+2,7
ДНТФ	1,90	103,8	108,8	+4,8
7-амино-4,6-динитробензофуросан	1,79	88,2	87,6	-0,7

по методике М-60 [4-6]. Здесь расчётные данные скорости метания пластины были получены с использованием выражения (1) при  $h_0 = h_{пл}$ .

**Расчёт скорости расширения медной цилиндрической оболочки.** При разработке теоретического метода оценки метательной способности индивидуальных ВВ по методике Т-20 использовался тот же подход, что и в [7], т. е. предполагалось, что кинетическая энергия ускоряемого тела пропорциональна объёмному энергосодержанию ВВ, а коэффициент отбора энергии зависит от объёмного числа молей газообразных продуктов взрыва.

Известно, что распределение скорости звука и массовой скорости частиц в плоской детонационной волне линейно. При этом состояние точки Жуге определяется по формуле  $D = C + U$ , где  $D$  — скорость ударной волны;  $C$  — объёмная скорость звука. Нами предлагается уравнение по определению скорости расширения медной цилиндрической оболочки в виде

$$W_{цил} = (C_{ВВ} + U)/2,66,$$

где делитель численно связан с коэффициентами уравнения ударной адиабаты  $D = \alpha + \lambda U$  соотношением  $\alpha/\lambda$ , т. е.  $3,98/1,495 = 2,66$ ;  $C_{ВВ}$  — объёмная скорость звука в ВВ.

Для оценки предложенного расчётного метода определения  $W_{цил}$  целесообразно сопоставить результаты вычислений с экспериментальными данными. Расчётные и экспериментальные значения скорости метания приведены в табл. 2. Экспериментальные данные брались из работ [4-6, 8]. Расчёт  $C_{ВВ}$  проводился по методу Рао [9],

Таблица 2

**Данные скорости расширения медной цилиндрической оболочки по методике Т-20**

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$W_{цил}$ , м/с		% ош.
		расчёт	эксперимент	
Нитрометан	1,14	1101	1092	+0,8
Бис-(нитраминометил)-нитрамин	1,85	1965	1907	+3,0
Гексоген	1,80	1779	1781	-0,1
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1,85	1541	1530	+0,7
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1,90	1607	1650	-2,6
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1,94	1781	1792	-0,6
Октоген	1,73	1654	1660	-0,4
Октоген	1,81	1796	1770	+1,4
Октоген	1,89	1853	1840	+0,7
Октоген	1,91	1989	1910	+4,1
Октанитро-диазаоктан	1,86	1771	1683	+5,2
Тринитроэтиловый эфир тринитромасляной кислоты	1,78	1548	1507	+2,7
Метилнитрат	1,21	1170	1133	+3,2
Диэтанолнитраминдинитрат	1,67	1678	1616	+3,8
ТЭН	1,67	1552	1661	-6,6
ТЭН	1,76	1704	1790	-4,8
ГНБ	1,96	1726	1710	+0,9
ГНБ	1,86	1582	1616	-2,1
ТАТБ	1,80	1542	1470	+4,9
ТНТ	1,63	1470	1460	+0,7
Тетрил	1,70	1527	1594	-4,2
Гексанитростильбен	1,65	1389	1440	-3,6
5-оксо-3-нитро-1,2,4-триазол	1,85	1302	1330	-2,1
Окфол-3,5	1,78	1710	1750	-2,3
А-IX-1	1,67	1697	1650	+2,8

массовая скорость  $U$  вычислялась по формуле [3]

$$U = \sqrt{\frac{\alpha_k + 1,65}{5,5} \rho_0 Q_m},$$

где  $\alpha_k$  — кислородный коэффициент ВВ;  $Q_m$  — максимальная теплота (энергия) взрыва, которая отвечает протеканию наиболее теплотворных реакций при разложении ВВ и соответствует максимуму энтропии.

**Анализ результатов и выводы.** Как видно из табл. 1 и 2, относительно высокие погрешности в расчёте скорости метания, по-видимому, говорят о том, что устойчивая стационарная детонация, самопроизвольно распространяющаяся со скоростью, постоянной для данного вещества, происходит при условии, когда скорость детонационной волны относительно продуктов реакции выше скорости звука в них. Это обстоятельство указывает на то, что, возможно, во время эксперимента с помощью мощной ударной волны в среде была возбуждена детонация с большей скоростью. Так, в работе [10] предложен один из возможных способов увеличения коэффициента отбора энергии от ВВ за счёт пересжатой детонационной волны, распространяющейся по заряду. Как показали модельные расчёты, в этом случае можно ожидать увеличения коэффициента отбора энергии от ВВ на 10 % (в зависимости от соотношения массы металла и ВВ). Суть предполагаемого эффекта заключается в том, что за счёт пересжатия детонационной волны продукты взрыва за её фронтом имеют большую удельную кинетическую энергию, а потому передают оболочке больший импульс, чем в случае выхода на стационарный режим детонации. Таким образом, пересжатая волна, возникающая в заряде ВВ, характеризуется увеличением сжатия и массовой скорости во фронте детонационной волны по мере её распространения, при этом происходит увеличение коэффициента преобразования химической энергии ВВ в энергию потока продуктов взрыва.

Следует отметить, что разработанные методики расчёта дают малую среднеквадратичную ошибку. Так, среднеквадратичная ошибка определения  $W_{\text{экв}}$  по методу эквивалентных масс составляет 3,33 %, а среднеквадратичная ошибка определения  $W_{\text{цпл}}$  составляет 1,73 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алтишулер Л. В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений // *УФН*, 1965. Т. 85, № 2. С. 197–258; англ. пер.: *Al'tshuler L. V.* Use of Shock Waves in High-Pressure Physics // *Sov. Phys. Usp.*, 1965. Vol. 8, no. 1. Pp. 52–91.
2. *Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А. и др.* Физика взрыва: в 2-х томах. Т. 1 / ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004. 823 с. [*Andreev S. G., Babkin A. V., Baum F. A., et al.* Physics of Explosion. Vol. 1 / ed. L. P. Orlenko. Moscow: Fizmatlit, 2004. 823 pp.]
3. *Кривченко А. Л.* Метод расчёта параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ // *ФГВ*, 1984. Т. 20, № 3. С. 83–86; англ. пер.: *Krivchenko A. L.* Method of computing the detonation parameters of condensed high explosives // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. Vol. 20, no. 3. Pp. 324–326.
4. *Казутин М. В., Комаров В. Ф., Попок Н. И.* Степень реализации энергетического потенциала взрывчатого вещества в метательную способность продуктов детонации // *Ползуновский вестник*, 2010. № 4–1. С. 92–95. [*Kazutin M. V., Komarov V. F., Popok N. I.* The degree of implementation of the energy potential of the explosive in the throwing ability of the detonation products // *Polzunovskiy Vestnik*, 2010. no. 4–1. Pp. 92–95].
5. *Смирнов С. П., Колганов Е. В., Кулакевич Я. С.* Связь метательного действия смесевых и индивидуальных ВВ с их составом и строением / В сб.: *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения*. Саров: ВНИИ-ЭФ, 2000. С. 410–412. [*Smirnov S. P., Kolganov E. V., Kulakevich Ya. S.* Relationship of throwing action mixtures and individual explosives to their composition and structure / In:

- Modern methods of design and testing of missile and artillery armament*. Sarov: VNIIEF, 2000. Pp. 410–412].
6. Пепекин В. И., Губин С. А. Метательная способность органических взрывчатых веществ и их пределы по мощности и скорости детонации // *ФГВ*, 2007. Т. 43, № 1. С. 99–111; англ. пер.: *Pepekin V. I., Gubin S. A. Propellant performance of organic explosives and their energy output and detonation velocity limits // Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007. Vol. 43, no. 1. Pp. 84–95.
  7. *Makhov M. N. Explosion Heat and Metal Acceleration Ability of High Explosives // AIP Conf. Proc.*, 2004. Vol. 706. Pp. 863–866.
  8. *van Thiel M., Kusubov A. S., Mitchell A. C. Compendium of shock wave data: Technical Report UCRL-50108*. Livermore, CA: Lawrence Radiation Lab., 1967.
  9. *Rao W. R. Velocity of Sound in Liquids and Chemical Constitution // J. Chem. Phys.*, 1941. Vol. 9, no. 9. Pp. 682–685.
  10. Лин Э. Э., Пащенко Э. Н., Тихомиров Б. П. Метание пластин продуктами пересжатой детонации заряда взрывчатого вещества с уменьшающейся плотностью // *ПМТФ*, 1993. № 1. С. 32–34; англ. пер.: *Lin É. É., Pashchenko É. N., Tikhomirov B. P. Theoretical models of detonation of a flat layer of condensed explosive with diminishing density // J. Appl. Mech. Tech. Phys.*. Vol. 34, no. 1. Pp. 28–30.

Поступила в редакцию 13/V/2011;  
в окончательном варианте — 13/VI/2011.

MSC: 76N15

## COMPUTING OF THROWING ABILITY OF THE EXPLOSIVES AT CYLINDRIC FRONT TOSsing OF METAL

*I. I. Reout, A. L. Krivchenko*

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia.

E-mails: enterfax@mail.ru, snex@rambler.ru

*Calculation methods of copper plate relative front tossing speed by equivalent mass method and the widening speed calculation methods for the copper cylindric confinement are offered. The calculation results were compared with experimental data. The mean-square deviation is less than 3,5 percent.*

**Key words:** *throwing ability, front tossing, cylindric shell extension.*

Original article submitted 13/V/2011;  
revision submitted 13/VI/2011.

---

*Igor I. Reout*, Postgraduate Student, Dept. of Protection of Extremal Situation. *Alexander L. Krivchenko* (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Protection of Extremal Situation.