

## МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОБАВКОЙ

И. М. Воскобойников

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, [voskob@chph.ras.ru](mailto:voskob@chph.ras.ru)

Исследована метательная способность зарядов октогена с технологической добавкой. Снижение метательной способности в большой степени определяется пористостью заряда, а при равном объемном содержании добавки, заполняющей поры, метательная способность убывает в ряду полиэтилен — витон — тротил. Предложена схема оценки метательной способности, в которой используется пропорциональность скорости метания и начальной скорости контактной границы «продукты взрыва — пластина» при соотношении толщин заряда и стальной (медной) пластины 10 : 1.

Ключевые слова: параметры детонации, метательная способность, взрывчатое вещество, инертная добавка, скорость метания.

### ВВЕДЕНИЕ

Используемые в практической деятельности заряды взрывчатых веществ, как правило, содержат добавки для придания им необходимых технологических свойств. Поскольку введение добавок снижает детонационные характеристики состава относительно характеристик исходного взрывчатого вещества, выбор добавки и ее содержания нужно оптимизировать для достижения желаемых технологических свойств состава при приемлемой метательной способности.

В отличие от таких характеристик, как скорость детонации  $D_1$ , давление  $p_1$  и массовая скорость  $u_1 = D_1/(n + 1)$  продуктов взрыва за фронтом волны ( $n$  — показатель политропы продуктов взрыва), метательная способность не имеет абсолютного значения, а является относительной величиной в выбранном виде испытания. Для ее оценки измеряют, например, скорость метания пластины с торца заряда (методика М-40) или скорость разлета цилиндрической оболочки заряда (методика Т-20 и цилиндр-тест) при фиксированном отношении толщин заряда и метаемого тела, обычно 10 : 1. Эти методики моделируют ситуации, встречающиеся на практике. В большинстве случаев имеется корреляция между значениями, полученными по разным методикам. Исключения возможны для состава окислитель — горючее, если время превращения за фронтом волны близко к времени ускорения метаемого тела.

### МЕТАНИЕ ПЛАСТИНЫ С ТОРЦА ЗАРЯДА

При торцевом метании в основном рассматривались значения скоростей, измеренных при использовании моделирующего методика М-40 лабораторного варианта [1]. В методике М-40 продукты взрыва заряда диаметром 40 мм и высотой 40 мм в стальной толстостенной оболочке разгоняют стальную пластину толщиной 4 мм при инициировании в центре верхнего торца заряда, что приводит к искривлению фронта детонационной волны. В лабораторном варианте сохранено отношение толщин заряда и пластины 10 : 1, но уменьшены в 4 раза толщины заряда и пластины при отсутствии ставшей излишней оболочки на боковой поверхности заряда, разлет которой оказывал нежелательное воздействие на взрывную камеру. Уменьшение толщины заряда облегчает исследование с менее доступными взрывчатыми веществами. Для моделирующего варианта разработан специальный блок инициирования, чтобы приблизить возникающее течение к одномерному, которое допускает наглядное математическое описание с получением аналитических решений. Скорости метания, определенные по методикам М-40 и лабораторной, совпадают в пределах погрешности определения.

Схема опытов представлена на рис. 1. Стальная пластина 1 толщиной 1 мм помещалась на торец заряда исследуемого взрывчатого вещества или состава 2 толщиной 10 мм и диаметром 40 мм. Детонация заряда инициировалась с противоположного торца по всему сечению ударом пластины из алюминия 3 тол-

Таблица 1

## Динамика разгона стальной пластины с торца заряда

№ п/п	ТГ 40/60			Октоген			Тротил		
	$l/\delta = 10/1$			$l/\delta = 10/1$			$l/\delta = 10/1$		
	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс
1	0.999	1.40	0.347	1.291	1.70	0.33	0.774	1.00	0.367
2	0.402	1.70	0.768	0.407	2.22	0.71	0.321	1.32	0.80
3	0.181	1.962	1.246	0.190	2.59	1.17	0.150	1.49	1.30
4	0.092	2.10	—	0.098	—	—	0.078	—	—

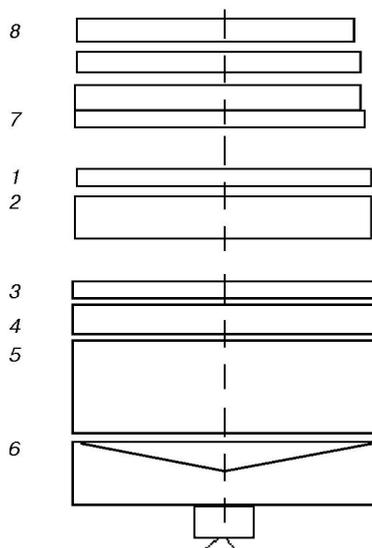


Рис. 1. Схема измерений:

1 — стальная пластина, 2 — заряд исследуемого ВВ, 3-6 — блок инициирования, 7, 8 — блок регистрации

щиной 1 мм со скоростью  $2.0 \div 2.5$  мм/мкс. Пластина 3 находилась на медной пластине 4 толщиной 5 мм, в которой ударная волна создавалась детонацией заряда 5 с использованием генератора плоского фронта 6. Из-за различия адиабат Гюгонио алюминия и меди, а также толщин пластин 3 и 4 времена подлета пластин к исследуемому заряду столь отличаются, что воздействием пластины 4 можно пренебречь. Специально проведенными опытами было показано, что изменение скорости инициирующей пластины 3 до 3.0 мм/мкс для исследованных взрывчатых веществ не приводило к изменению скорости метания стальной пластины 1, т. е. поджатие продуктов взрыва основ-

ного заряда 2 несущественно. Скорость метания стальной пластины 1, которая характеризует исследуемое взрывчатое вещество или состав, измерялась после пролета базы  $10 \div 15$  мм по скорости ударной волны или яркости свечения ударного фронта в индикаторной среде 8, расположенной на пути движения пластины за экраном 7 [1, 2]. При отработке схемы проведения экспериментов установлено, что варьирование базы пролета от 7 до 20 мм не приводит к изменению скорости стальной пластины, что указывает на завершение ее разгона при пролете расстояния 7 мм.

В табл. 1 приведены результаты расчета разгона стальной пластины толщиной  $\delta$ , мм, продуктами взрыва зарядов октогена ( $\rho_0 = 1.9$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 9.1$  мм/мкс), ТГ 40/60 ( $\rho_0 = 1.68$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 7.8$  мм/мкс) и тротила ( $\rho_0 = 1.62$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 6.92$  мм/мкс) толщиной  $l$ , мм. Указаны начальные приращения массовой скорости в каждой циркуляции волн  $\Delta u_p$ , скорость контактной границы к концу циркуляции  $w$  и время завершения соответствующей циркуляции  $t_3$ . При выбранном отношении толщин заряда и пластины основное приращение скорости метания происходит в первой циркуляции волн, а конечное ее значение оказывается пропорциональным начальной скорости  $u_{к0}$  контактной границы «продукты взрыва — пластина», что отмечено в [1] (табл. 2).

Скорость  $u_{к0}$  находится при совместном решении ударной адиабаты или изоэнтропы продуктов взрыва и адиабаты Гюгонио материала пластины. При разложении в ряд выражений для ударной адиабаты и изоэнтропы продуктов взрыва по степеням отношения  $(p_{к0} - p_1)/p_1 = x$  имеем

Таблица 2  
Скорости метания пластин ( $w$ ) с торца  
зарядов взрывчатых веществ и их смесей

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$w$ , мм/мкс	$w_{\text{отн}}$	$u_{\text{к0}}$ , мм/мкс
ТГ 40/60	1.66	1.66	1.0	1.0
Тротил/октоген 20/80	1.76	1.85	1.11	1.12
Гексоген	1.68	1.80	1.08	1.09
Октоген	1.78	2.05	1.23	1.21
Тэн	1.67	1.75	1.05	1.04
Тротил	1.60	1.29	0.78	0.77

Примечание.  $w_{\text{отн}}$  — скорость метания пластин относительно скорости метания составом ТГ 40/60.

$$\frac{u_{\text{к0}}}{u_1} = 1 - \frac{p_{\text{к0}}}{p_1} \sqrt{\frac{(n+1)(p_{\text{к0}}/p_1) + \frac{n-1}{2n}}{2n}} \approx$$

$$\approx 1 - x + \frac{(n+1)x^2}{4n} - \frac{3(n+1)x^3}{16n^2} + \dots,$$

$$\frac{u_{\text{к0}}}{u_1} = 1 + \frac{2n[1 - (p_{\text{к0}}/p_1) \uparrow ((n-1)/2n)]}{n-1} \approx$$

$$\approx 1 - x + \frac{(n+1)x^2}{4n} - \frac{(3n+1)(n+1)x^3}{12n^2} + \dots$$

В практических расчетах достаточно выражения для изоэнтропы при любом соотношении  $p_{\text{к0}}$  и  $p_1$ . Отличие в последних членах равно 0.01 при  $x = 0.5$  и  $u_{\text{к0}}/u_1 \approx 0.7$ . Если пренебречь вкладом членов со степенью более 1, получим выражение  $u_{\text{к0}}/u_1 + p_{\text{к0}}/p_1 = 2$ , которое дает приемлемую для большинства оценок точность. Если адиабата Гюгонио материала пластины записывается в виде  $u_s = c_0 + bu_p$ , то  $u_{\text{к0}} = -A + \sqrt{A^2 + 2p_1/(\rho_{0\text{м}} b)}$ ,  $A = 0.5(c_0/b + \rho_0 D_1/(\rho_{0\text{м}}/b))$ , где  $c_0$  — скорость звука,  $u_p$  — массовая скорость частиц,  $\rho_{0\text{м}}$  — начальная плотность материала.

Исходя из пропорциональности скорости метания и начальной скорости контактной границы, можно оценить зависимости скорости метания пластины от пористости заряда и содержания взрывчатых компонентов, используемых в качестве связки. Например, для часто применяемого октогена относительное снижение скорости метания  $y = 1 - w/w_1$  в зависимости от пористости заряда  $k = 1 - \rho/\rho_0$  в

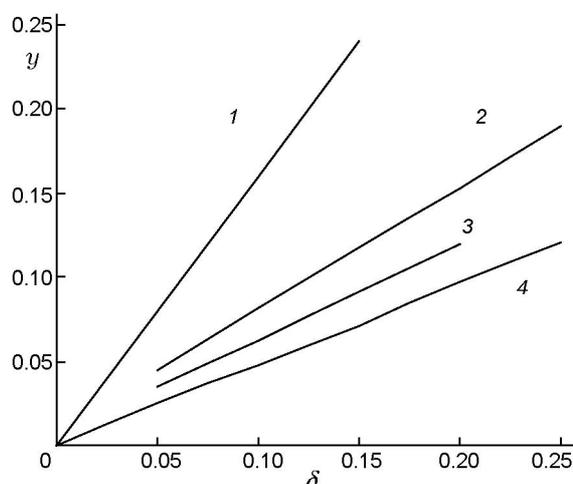


Рис. 2. Снижение относительной скорости метания пластины в зависимости от объемного содержания технологической добавки в заряде октогена:

1 — пористый заряд без добавки, 2 — заряд с полиэтиленом, 3 — заряд с витоном, 4 — заряд с тротилом

практически интересующем диапазоне описывается соотношением  $y_1 = 1.596k$ , а от введения в заряд (для устранения пористости) тротила, более слабого взрывчатого вещества, —  $y_4 \approx 0.55m$ , где  $m$  — массовая доля тротила. Эти зависимости с хорошей точностью соответствуют экспериментальным данным. Существенно, что при заполнении пор в заряде октогена тротилом относительное снижение скорости метания пластины уменьшается втрое по сравнению с пористым зарядом октогена (кривые 1 и 4 на рис. 2).

В предположении пропорциональности скорости метания и начальной скорости на контактной границе «продукты взрыва — пластина» можно прогнозировать снижение скорости метания при введении в заряд инертной связки (например, полиэтилена и витона). Так, при использовании схемы расчета параметров детонации для смесей ВВ с инертными добавками [3] относительное снижение начальной скорости контактной границы на 0.14 ожидалось при введении в заряд в качестве связки полиэтилена с массовой долей  $m = 0.08$  и витона с  $m = 0.18$ . Точность прогноза зависит от достоверности выбранных значений давления детонации.

Экспериментальные данные о снижении скорости метания пластины при введении в

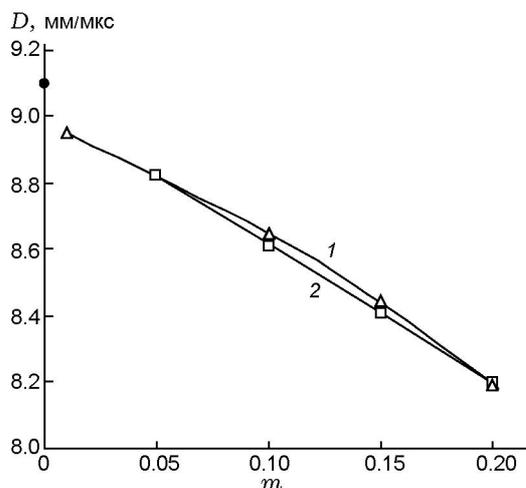


Рис. 3. Зависимости скорости детонации смесевых зарядов октогена от содержания в них полиэтилена (кривая 1) и витонона (кривая 2)

заряд октогена связки типа полиэтилена при  $m > 0.01$  удастся описать выражением  $y_2 = 1.3321m + 0.0124$ , а для витонона —  $y_3 = 0.314m + 0.0068$ . Различный эффект при введении в заряд полиэтилена и фторопласта был отмечен еще в [4]. Выражения не экстраполируются к нулевому значению в отсутствие связки, поскольку малое количество связки, зависящее от дисперсности частиц взрывчатого вещества (для октогена в слое  $0.1 \div 0.2$  мкм), прогревается и, возможно, происходит его частичная деструкция за время превращения взрывчатого вещества за фронтом волны. Это находит отражение в зависимостях скорости детонации смесей октогена с полиэтиленом и витоном (кривые 1 и 2 на рис. 3), которые были исследованы более детально (точность измерения 0.5 мм/мкс). При  $m > 0.03$  скорость метания

с приемлемой точностью можно оценить, используя ее пропорциональность начальной скорости контактной границы, рассчитанной для сжимаемой непрогретой добавки. Эффект от заполнения пор в заряде октогена полиэтиленом или витоном в качестве связки иллюстрируют кривые 2 и 3 на рис. 2 (соответственно  $y_2 = 0.783k + 0.0124$ ,  $y_3 = 0.568k + 0.0068$ ,  $y_4 = 0.482k$ ). Качественно он близок к ожидаемому изменению при пропорциональности скорости метания и начальной скорости контактной границы «продукты взрыва — пластина», а также расчете параметров детонации [3] в случае заполнения пор полиэтиленом и витоном.

Наибольшее снижение скорости метания вызывает пористость заряда. Например, чтобы ликвидировать пористость 0.15 в заряде октогена, которая приводит к уменьшению относительной скорости метания на 0.24, нужно ввести полиэтилен в количестве  $m = 0.8$ , витон  $m = 0.14$  или тротил  $m = 0.13$ . Это приведет к относительному уменьшению скорости метания соответственно на 0.12, 0.09 и 0.07 вместо 0.24. Снижение скорости метания будет несколько больше (0.146 и 0.13) при уменьшении содержания связки вдвое (полиэтилена до 0.04 и тротила до 0.065) и связанной с этим пористостью зарядов 0.04 и 0.065.

## МЕТАНИЕ ОБОЛОЧКИ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАРЯДА

Изложенный выше подход к оценке металлической способности зарядов, содержащих технологическую добавку, применим при рассмотрении приведенных в [5] значений скорости разлета медной оболочки с боковой поверхности заряда. В табл. 3 представлены результаты

Таблица 3

Динамика разгона медной пластины с боковой поверхности заряда

№ п/п	ТГ 40/60			Октоген			Тротил		
	$l/\delta = 10/1$			$l/\delta = 20/2$			$l/\delta = 20/2$		
	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс	$\Delta u_p$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$t_3$ , мкс
1	0.50	0.839	0.8	0.686	1.123	0.744	0.402	0.649	1.04
2	0.277	1.044	1.682	0.325	1.64	1.528	0.22	0.95	2.56
3	0.151	1.360	2.558	0.185	1.922	2.269	0.114	1.107	3.74
4	0.088	1.538	3.40	0.1	2.065	3.226	0.062	1.194	4.956

Таблица 4  
Скорости расширения оболочек ( $w_1$ )  
цилиндрических зарядов

ВВ	Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	$w_1$ , мм/мкс	$u_{к0}$ , мм/мкс
Октоген	1.89	1.64	0.655
Тротил	1.63	1.18	0.4
Нитрометан	1.14	1.01	0.28
Тротил/гексоген 36/64	1.72	1.39	0.54
Тротил/октоген 22/78	1.865	1.53	0.615
Тэн	1.765	1.56	0.57
Октоген/витон 85/15	1.866	1.50	0.59
Октоген/полиэтилен 92/8	1.72	1.48	0.575

расчета динамики ускорения медной пластины, находящейся на боковой поверхности плоского заряда, при распространении детонационной волны вдоль нее. Как и при торцевом метании (см. табл. 1), основной вклад в скорость метания дает ее прирост в первой циркуляции волн. Для плоского случая эксперименты с медной пластиной не проводились, но скорости медной цилиндрической оболочки  $w_1$  при расширении в 1.33 раза [5] пропорциональны начальной скорости  $u_{к0}$  контактной границы «продукты взрыва — пластина» (табл. 4), при этом следует отметить, что несколько выпадают значения для тэна. При расчете  $u_{к0}$  для скользящей детонации можно воспользоваться удобным для запоминания выражением  $u_{к0}/u_1 + p_{к0}/p_1 = 1$ , полученным, как и для падающей волны, при разложении в ряд по относительному изменению давления выражения для массовой скорости на изоэнтропе продуктов взрыва из состояния  $p_1, u_1 = 0$ .

Для упомянутого выше варианта с заполнением пор в заряде октогена (пористостью 0.15) полиэтиленом ( $m = 0.08$ ), витонем ( $m = 0.14$ ) и тротилом ( $m = 0.13$ ) ожидается уменьшение относительной начальной скорости на 0.12, 0.1 и 0.06 соответственно. Если поры не заполняются, то значение  $u_{к0}$  уменьшится на

0.22. По результатам измерений при введении в заряд полиэтилена массой  $m = 0.08$ , витона  $m = 0.15$  и тротила  $m = 0.13$  скорость расширения оболочки на начальной стадии была меньше на 0.12, 0.09 и 0.04 соответственно. Экстраполяция значений для составов с октогеном и гексогеном дает уменьшение скорости расширения на  $0.2 \div 0.22$  при пористости заряда октогена 0.15.

Для смеси октогена с витонем снижение скорости метания меньше рассчитанного из условия пропорциональности скорости метания и начальной скорости контактной границы «продукты взрыва — пластина» в обоих вариантах, торцевом и боковом. Возможно, витон не является полностью инертной добавкой при метании пластины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что снижение метательной способности в основном определяется пористостью зарядов, которая реализуется при выбранной технологии снаряжения, а при введении в состав заполняющей поры технологической добавки уменьшается в ряду полиэтилен — витон — тротил.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воскобойников И. М., Воскобойникова Н. Ф. Оценка метательного действия взрывчатых веществ // Детонация: материалы 2-го Всесоюзного совещания по детонации. — Черноголовка, 1981. — Вып. 2. — С. 64–67.
2. Воскобойников И. М. Скорости метания пластин из разных материалов продуктами детонации // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 118–123.
3. Воскобойников И. М., Котомин А. А. Расчет параметров детонации смесей ВВ с инертными добавками // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 5. — С. 93–97.
4. Воскобойников И. М., Котомин А. А., Воскобойникова Н. Ф. Влияние инертных добавок на скорость метания пластин смесевыми взрывчатыми веществами // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 6. — С. 108–111.
5. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.

Поступила в редакцию 1/VII 2009 г.