

## ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
kobylikin\_ivan@mail.ru

Представлено теоретическое обоснование корреляционных соотношений между критическим диаметром зарядов ВВ и характеристиками их ударно-волновой чувствительности. С использованием разработанной автором теории критического диаметра и обобщенной кинетической характеристики разложения ВВ, определяемой по экспериментальной зависимости расстояния перехода инициирующей ударной волны в детонационную от амплитуды волны, получены соотношения для критического радиуса кривизны фронта детонационной волны и для критического диаметра детонации. Количественный анализ этих соотношений показал хорошее согласие с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: детонация, критический диаметр, чувствительность, ударно-волновое инициирование детонации, кинетика разложения ВВ.

Возможность практического использования зарядов взрывчатых веществ (ВВ) определяется в основном их детонационной способностью и чувствительностью. Основными характеристиками детонационной способности являются критический диаметр детонации  $d_{cr}$  — наименьший диаметр цилиндрического заряда ВВ, в котором еще возможно распространение самоподдерживающейся детонации, и зависимость скорости детонации  $D$  от диаметра заряда ВВ  $d$ . Чувствительность зарядов ВВ — более сложное собирательное понятие, которое можно определить, как способность зарядов ВВ реагировать на различные внешние воздействия возникновением взрывных процессов [1]. Количественно чувствительность зарядов ВВ к тому или иному воздействию характеризуется либо некоторой критической интенсивностью (амплитудой) воздействия, при превышении которой в заряде ВВ возбуждается тот или иной режим взрывного превращения, либо взаимосвязью характеристик воздействия с характеристиками возникающей в заряде ВВ ответной реакции. В частности, ударно-волновая чувствительность может характеризоваться массой или размерами минимального инициирующего заряда какого-либо ВВ, выбранного в качестве тестового; критической (минимальной) толщиной преграды  $h_{cr}$  между инициирующим (активным) и инициируемым (пассивным) зарядами ВВ, предот-

вращающей передачу детонации; критической энергией  $E_{cr}$ , вводимой в заряд ВВ инициирующей ударной волной; зависимостью давления  $p$  инициирующей ударной волны от расстояния  $l$  ее перехода в детонационную волну (преддетонационным расстоянием) [1].

Проведение полного комплекса исследований по определению детонационной способности и ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ является весьма трудоемким и дорогостоящим. Поэтому представляет интерес получить предварительную оценку ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ или их детонационной способности, располагая минимальным набором наиболее просто получаемых опытных данных.

Обычно взаимосвязь между критическим диаметром детонации заряда ВВ и его ударно-волновой чувствительностью анализируется на качественном уровне. Как правило, более чувствительные заряды ВВ имеют меньшие критические диаметры детонации и наоборот. В работах [2, 3] путем корреляционного анализа большого объема экспериментальных данных были установлены количественные взаимосвязи между  $d_{cr}$  и такими характеристиками ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ, как критическая энергия  $E_{cr}$ ; радиус  $r_{min}$  минимального инициирующего заряда ВВ из эластичного состава на основе тэна ХТХ-8003, располагаемого в полусфери-

ческой полости на торце исследуемого заряда ВВ (minimum primary charge (МРС) [4]); критическая толщина преграды  $h_{cr}$  из латуни или алюминиевого сплава между инициирующим зарядом ВВ из состава РВХ-9505 на основе гексогена и инициируемым зарядом ВВ (large-scale и small-scale gap test, соответственно LSGT и SSGT), а также параметрами зависимости  $p(l)$ .

Полученная в [2] зависимость имеет вид

$$E_{cr} = 0.531kd_{cr},$$

где  $k = 1.0$  для зарядов ВВ и  $k = 1.885$  для твердых ракетных топлив; размерность  $E_{cr}$  — МДж/м<sup>2</sup>,  $d_{cr}$  — мм. Хотя это соотношение представляется весьма важным для практического использования, в большей степени распространены характеристики ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ, связанные с некоторыми характерными длинами — критической толщиной преграды  $h_{cr}$  между инициирующим и инициируемым зарядами ВВ, радиусом  $r_{\min}$  минимального инициирующего заряда ВВ. Так, например, корреляционная зависимость  $d_{cr}(h_{cr})$  для алюминиевого сплава (LSGT) имеет вид [3]

$$\lg d_{cr} = 2.0316 - 0.03437h_{cr}, \quad [d_{cr}] = [h_{cr}] = \text{мм.}$$

Наиболее полной характеристикой ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ являются зависимости  $p(l)$  или  $l(p)$ , которые обычно представляют в виде [5]

$$p = A_0 + \frac{A}{(l/l_0)^n}, \quad \frac{l}{l_0} = \left( \frac{A}{p - A_0} \right)^{1/n}, \quad (1)$$

где  $A_0$ ,  $A$ ,  $n$  — эмпирические постоянные, характеризующие заряд ВВ;  $l_0$  — масштабная длина;  $[p] = [A] = \text{ГПа}$ ;  $[l] = [l_0] = \text{мм}$ . В известных аппроксимациях экспериментальных данных обычно  $A_0 = 0$ ,  $l_0 = 1$  мм.

Выполненный в [2] анализ результатов измерений радиусов  $r_{\min}$  минимальных инициирующих полусферических зарядов из ХТХ-8003, преддетонационных расстояний  $l$  и критических диаметров детонации  $d_{cr}$  показал, что для большинства зарядов ВВ

$$r_{\min} = l(8.3) = (A/8.3)^{1/n}, \quad (2)$$

а

$$d_{cr} = 0.685r_{\min} = 0.685(A/8.3)^{1/n}. \quad (3)$$

Здесь  $l$  — преддетонационное расстояние, соответствующее давлению в инициирующей ударной волне амплитудой  $p = 8.3$  ГПа. Как отмечается в работах [2, 3], зависимости (2) и (3) дают неплохие результаты для достаточно чувствительных зарядов ВВ с относительно большими значениями  $n$  ( $n > 0.4$ ) и плохо описывает данные для низкочувствительных зарядов ВВ, например, на основе ТАТБ, у которых  $n < 0.4$ .

В данной статье предпринята попытка теоретического обоснования и корректировки приведенных выше корреляционных соотношений на основе разработанной автором теории критического диаметра [1, 6, 7]. Эта теория исходит из того, что существует минимальный критический радиус кривизны детонационного фронта  $R_{cr}$ , при котором еще возможно распространение самоподдерживающейся детонации. В [6] получено выражение

$$R_{cr} = \frac{2uc^2}{\Gamma Q_{p,V}W}, \quad (4)$$

в котором  $u$ ,  $c$  — соответственно массовая скорость и скорость звука в ударно-сжатом ВВ непосредственно за ударным скачком в самом начале зоны химической реакции детонационного фронта;  $Q_{p,V}$  — тепловой эффект разложения ВВ при постоянных давлении  $p$  и объеме  $V$ ;  $W$  — начальная скорость разложения ВВ;  $\Gamma$  — параметр Грюнайзена ударно-сжатого ВВ. Естественно отождествить критический радиус кривизны детонационного фронта  $R_{cr}$  с радиусом  $r_{\min}$  минимального инициирующего полусферического заряда ВВ.

Для того чтобы связать  $d_{cr}$  с  $R_{cr}$  предполагается, что на пределе распространения детонации фронт детонационной волны является сферическим с радиусом кривизны  $R_{cr}$ , а угол наклона детонационного фронта к образующей цилиндрической поверхности заряда ВВ равен так называемому звуковому углу  $\varphi_*$ , при котором за ударным скачком на краю заряда реализуется звуковой режим течения ударно-сжатого ВВ. Тогда из геометрических соображений следует соотношение [6]

$$d_{cr} = 2R_{cr} \cos \varphi_* = \frac{4uc^2 \cos \varphi_*}{\Gamma Q_{p,V}W}. \quad (5)$$

Для вычисления  $R_{cr}$  и  $d_{cr}$  с помощью соотношений (4) и (5) необходимо знать кинетику разложения, уравнение состояния ударно-сжатого реагирующего ВВ и минимальную

критическую скорость детонации  $D_{cr}$  или зависимость скорости детонации  $D$  от диаметра заряда ВВ  $d$ . Входящая в знаменатели соотношений (4) и (5) обобщенная кинетическая характеристика  $K$  процесса разложения ВВ за ударным скачком

$$K = \Gamma Q_{p,V} W$$

в настоящей работе определяется с помощью экспериментальной зависимости  $p(l)$ . Для ударной волны прямоугольного профиля в [7] получено следующее выражение:

$$K = \frac{nAD}{a_H f(u) \rho} \left( \frac{p - A_0}{A} \right)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (6)$$

в котором  $f(u) = \frac{D}{a_H D + \rho^2 c^2 / \rho_0}$ ;  $a_H = \rho_0(a + 2bu)$ ;  $a$ ,  $b$  — коэффициенты линейного уравнения ударной адиабаты ВВ  $D = a + bu$ ;  $\rho_0$ ,  $\rho$  — начальная плотность и плотность ударно-сжатого ВВ. Для расчета значений  $R_{cr}$  и  $d_{cr}$  необходимо знать состояние ударно-сжатого ВВ непосредственно за ударным скачком в самом начале зоны химической реакции, где глубиной разложения ВВ можно пренебречь. Поэтому для расчета параметров  $u$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $c$  используются «инертные» ударные адиабаты ВВ, полученные в диапазоне сравнительно низких давлений. Если же при расчете  $d_{cr}$  используются ударные адиабаты ВВ, полученные в экспериментах с достаточно высокими давлениями ( $\approx 10 \div 20$  ГПа), то надобность в последнем замечании отпадает, поскольку разложение ВВ во фронте ударной волны (если оно имеет место) учитывается автоматически. Использование данных по ударно-волновому инициированию детонации для определения  $K$  позволило в работе [8] с помощью соотношений (5) и (6) с удовлетворительной точностью рассчитать значения критических диаметров детонации для ряда ВВ.

Для расчета скорости звука в ударно-сжатом веществе используется формула, предложенная в [9]:

$$c = \frac{[a + (b - 1)u](a + 2bu)}{a + bu}.$$

Угол наклона детонационного фронта  $\varphi_*$ , при котором течение за ударным фронтом на краю заряда становится звуковым, определяется из системы уравнений [1]:

$$\sin \varphi_* = \frac{D_n^2}{\sqrt{(D_n - u)^2 (D_n + bu)^2 + 2D_n^3 u - D_n^2 u^2}},$$

$$D = \frac{D_n}{\sin \varphi_*},$$

$$D_n = a + bu,$$

где  $D_n$  — нормальная составляющая скорости фронта у поверхности заряда ВВ. Для высокоплотных зарядов ВВ  $\varphi_* \approx 50^\circ$ ,  $\cos \varphi_* = 0.643$  (кроме состава ХТХ-8003, для которого  $\varphi_* \approx 43^\circ$ ).

После подстановки в (4) выражения (6) получим

$$R_{cr} = \frac{2}{n} \left( \frac{A}{p} \right)^{1/n} \frac{\rho c^2 (a + 2bu)}{D(a_H D + \rho^2 c^2 / \rho_0)}. \quad (7)$$

Как показывает количественный анализ, для большого набора высокоплотных зарядов ВВ значение функции

$$F(u) = \frac{\rho c^2 (a + 2bu)}{D(a_H D + \rho^2 c^2 / \rho_0)}$$

при массовой скорости  $u = 1 \div 4$  км/с, что соответствует волновой скорости  $D = 4 \div 10$  км/с, изменяется в пределах  $F(u) = 0.6 \div 0.7$ . Принимая в указанном диапазоне скоростей среднее значение  $F(u) = 0.65$ , формулу для вычисления  $R_{cr}$  запишем в виде

$$R_{cr} = \frac{1.3}{n} \left( \frac{A}{p} \right)^{1/n}. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что структура формулы (8) совпадает со структурой формулы (2) для радиуса  $r_{\min}$ . Представляется целесообразным провести сравнение расчетных значений  $R_{cr}$  и экспериментальных величин  $r_{\min}$ . При расчете  $R_{cr}$  по формуле (8) давление  $p$  в инициирующей ударной волне следует принять равным давлению  $p_x$  нагружения заряда ВВ продуктами детонации инициирующего заряда ВВ из состава ХТХ-8003. Характеристики состава ХТХ-8003 принимались следующими: плотность  $\rho_1 = 1.53$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $D_1 = 7300$  м/с, показатель политропы продуктов детонации  $k = 3$  [8]. Необходимые для проведения расчетов данные по ударным адиабатам ВВ, взятые из [4, 10], приведены в табл. 1.

Рассчитанное давление  $p_x$  оказалось достаточно близким к давлению детонации инициирующего заряда  $p_1 = \rho_1 D_1^2 / (k + 1)$ , поэтому

Таблица 1

Исходные данные для расчета критических радиусов и диаметров

№ п/п	ВВ	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$D = a + bu$		$p = A/l^n$		$D(d)$		
			$a$ , м/с	$b$	$A$ , ГПа	$n$	$D_{id}$ , м/с	$D_{cr}$ , м/с	$\eta = D_{cr}/D_{id}$
1	Состав В	1720	2710	1.86	0.173	0.761	7859	6800	0.87
2	РВХ 9404	1840	2494	2.09	0.129	0.67	8776	7000	0.80
3	ТНТ лит.	1630	2794	1.555	2.754	0.32	6990	6740	0.96
4	ТНТ прес.	1630	2570	1.88	0.439	0.618	6990	6500	0.92
5	РВХ 9502	1896	3260	1.68	3.874	0.32	7706	7400	0.96
6	ХТХ 8003	1500	1590	3.24	0.427	0.37	7260	6550	0.90
7	Баротол	2610	2360	1.773	1.445	0.3	4874	4117	0.84
8	Гексоген флегматизированный	1635	2160	1.95	23.44	1	8200	—	—

Таблица 2

Результаты расчетов и экспериментальные данные

№ п/п	ВВ	$d_{cr}$ , мм (расчет)		$d_{cr}$ , мм (эксперимент)	$R_{cr}$ , мм (расчет)	$r_{min}$ , мм (эксперимент)
		$\eta = D_{cr}/D_{id}$	$\eta^2 = 0.8$			
1	Состав В	4.04	3.84	4.3	3.24	4.24
2	РВХ 9404	1.08	0.77	1.18	1.01	1.92
3	ТНТ лит.	16	24	14 ÷ 24	7.8	7.33
4	ТНТ прес.	7.7	8.5	3 ÷ 5	4.225	4.97
5	РВХ 9502	11	17	9 ÷ 15	23	>11.4
6	ХТХ 8003	0.37	0.38	0.36	—	—
7	Баротол	36	17	43.6	—	—
8	Гексоген флегматизированный	—	1.8	<3.3	—	—

при расчете  $R_{cr}$  по формуле (8) вместо  $p_x$  подставлялось расчетное давление детонации состава ХТХ-8003  $p_1 = 20.4$  ГПа. Результаты расчетов  $R_{cr}$  и соответствующие экспериментальные данные для ряда ВВ из [3, 4, 10] приведены в табл. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее согласие. Его можно улучшить, если вместо расчетного значения  $p_1 = 20.4$  ГПа в формулу (8) подставить измеренное давление детонации состава ХТХ-8003  $p_1 = 17$  ГПа [10].

Используя соотношения (5) и (8) и принимая для  $\cos \varphi_*$  среднее значение 0.643, получим формулу для вычисления критического

диаметра детонации:

$$d_{cr} = \frac{1.67}{n} \left( \frac{A}{p} \right)^{1/n}. \quad (9)$$

Поскольку на пределе детонации профиль давления в зоне химической реакции близок к прямоугольному, то в формулу (9) следует подставлять давление детонации  $p$  при критическом диаметре заряда. Поскольку  $p \sim D^2$ , давление можно рассчитать по соотношению

$$p = \eta^2 p_{id},$$

где  $\eta = D_{cr}/D_{id}$ ;  $D_{cr}$  — скорость детонации при  $d = d_{cr}$ ;  $D_{id}$ ,  $p_{id}$  — скорость и давление

идеальной детонации. С учетом последнего соотношения формулу (9) можно переписать в виде

$$d_{cr} = \frac{1.67}{n} \left( \frac{A}{\eta^2 p_{id}} \right)^{1/n}. \quad (10)$$

К сожалению, критическая скорость детонации измеряется, как правило, с большими погрешностями и известна к тому же для небольшого количества взрывчатых составов. В табл. 1 приведены ее расчетные значения из работы [10], скорректированные в соответствии с графическими зависимостями из работы [9]. В этой же таблице представлены значения отношения скоростей детонации  $\eta = D_{cr}/D_{id}$ , которые колеблются в диапазоне  $0.84 \div 0.96$ . В соответствии с этим поправочные множители  $\eta^2$  изменяются в пределах  $0.70 \div 0.92$ . Результаты расчетов критического диаметра по формуле (10) и соответствующие экспериментальные данные из [4, 9] приведены в табл. 2. В нижних строках табл. 1 и 2 представлены данные для зарядов ВВ из флегматизированного гексогена ( $94 \div 95\%$  — гексоген,  $5 \div 6\%$  — парафин) плотностью  $1.63 \div 1.64$  г/см<sup>3</sup>. Данные по ударной адиабате и зависимости  $p(l)$  взяты из работы [11], экспериментальные значения  $d_{cr}$  приведены для состава А-IX-I. Учитывая некоторую неопределенность исходных данных по  $D_{cr}$ , можно отметить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментально определенных значений  $d_{cr}$ . Использование среднего значения  $\eta^2 = 0.8$  дает несколько худшие, но для предварительных оценок вполне подходящие результаты.

Таким образом, на основе разработанной автором теории критического диаметра получены соотношения между критическим диаметром зарядов ВВ и характеристиками их ударно-волновой чувствительности — радиусом  $r_{\min}$  минимального инициирующего полусферического заряда ВВ и параметрами  $A$  и  $n$  зависимости  $p(l)$ . Количественный анализ этих соотношений показывает их удовлетворительное согласие с известными экспериментальными данными. Использование полученных соотношений позволяет выполнять предвари-

тельную оценку ударно-волновой чувствительности и детонационной способности зарядов ВВ, располагая минимальным набором опытных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва: в 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
2. **Weston A. M., Kinkaid J. F., James E., Lee E. L., Green L. G., Walton J. R.** Correlation of the results initiation test // The 7th Symp. (Intern.) on Detonation. — Washington, 1981.
3. **Price D.** Examination of some proposed relations among HE sensitivity data // J. Energetic Mater. — 1985. — V. 3. — P. 239–254.
4. **LASL Explosive Property Data** / T. R. Gibbs, A. Popolato (Eds). — Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
5. **Ramsay J. B., Popolato A.** Analysis shock wave and initiation data for solid explosives // The 4th Symp. (Intern.) on Detonation, White Oak, Maryland, 1965. — Washington: Office of Naval Research, 1967.
6. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных зарядов ВВ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 120–123.
7. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н.** Ударные и детонационные волны. Методы исследования. — М.: Физматлит, 2004.
8. **Кобылкин И. Ф.** Вычисление критического диаметра детонации зарядов взрывчатого вещества по данным их ударно-волнового инициирования // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 112–115.
9. **Campbell A. W., Engelke R.** The diameter effect in high-density heterogeneous explosives // The 6th Symp. (Intern.) on Detonation. — Arlington, Virginia, 1976.
10. **Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants** / B. M. Dobratz (Ed.). — Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1974, 1981.
11. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М.** Десенсибилизация флегматизированного гексогена и октогена последовательными ударными волнами // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 2. — С. 114–124.

Поступила в редакцию 11/VII 2008 г.