

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПО ДАННЫМ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
sm4@sm.bmstu.ru

Статья посвящена дальнейшему развитию количественной теории критического диаметра детонации, разработанной автором ранее. Согласно этой теории для расчета критического диаметра необходимо знать ударную адиабату, скорость детонации и обобщенную кинетическую характеристику разложения заряда взрывчатого вещества (ВВ) при его ударно-волновом сжатии. Предлагается обобщенную кинетическую характеристику разложения ВВ извлекать из экспериментально определяемой зависимости амплитуды ударной волны от пройденного ею расстояния при ударно-волновом инициировании заряда ВВ. Такой подход позволяет с достаточной точностью рассчитывать критические диаметры детонации зарядов ВВ.

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

Критическим диаметром детонации d_{cr} называют наименьший диаметр цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ), в котором еще возможно распространение самоподдерживающейся детонации. Величина d_{cr} является важнейшей характеристикой детонационной способности зарядов ВВ. Обычно d_{cr} определяют экспериментально с использованием достаточно простых методов [1]. Некоторые трудности технологического характера возникают при определении d_{cr} для ВВ с высокой детонационной способностью, когда необходимо изготавливать высокоплотные заряды диаметром $d \leq 1$ мм. Для ВВ с низкой детонационной способностью при определении d_{cr} , наоборот, необходимо взрывать заряды большого диаметра (100 мм и более) и сравнительно большой массы, что делает невозможным проведение соответствующих экспериментов в лабораторных условиях.

При разработке новых взрывчатых составов для сокращения числа экспериментов существует необходимость прогнозирования значения d_{cr} с помощью расчетов. В качестве методологической основы таких методов можно использовать теорию критического диаметра, разработанную в [1–3]. Согласно этой теории величина d_{cr} определяется соотношением

$$d_{cr} = \frac{4uc^2 \cos \varphi_*}{\Gamma Q_{p,V} W}, \quad (1)$$

где u и c — соответственно массовая скорость и скорость звука в ударно-сжатом ВВ непосредственно за ударным скачком в самом начале зоны химической реакции; $Q_{p,V}$ — тепловой эффект разложения ВВ при постоянных давлении p и объеме V ; W — начальная скорость разложения ВВ; Γ — параметр Грюнаузена ударно-сжатого ВВ; φ_* — угол наклона детонационного фронта к образующей цилиндрической поверхности заряда ВВ, при котором за фронтом ударной волны достигается звуковой режим течения. Количественный анализ соотношения (1), выполненный для ряда ВВ в [2], показал удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных значений d_{cr} . С помощью этой теории удастся объяснить влияние оболочки и свойств материала, из которой она изготовлена, на величину d_{cr} , а также построить зависимости для расчета d_{cr} , учитывающие структуру и состав зарядов ВВ [1]. В частности, находит естественное объяснение известная зависимость для расчета значения d_{cr} неоднородных пористых зарядов ВВ.

$$\frac{1}{d_{cr}} = \frac{1}{d_{cr}^{\text{TMD}}} + gs,$$

где d_{cr}^{TMD} — критический диаметр сплошного заряда ВВ, s — удельная поверхность пористого заряда ВВ, g — эмпирическая постоянная. На основе этой зависимости построена одна из немногих эмпирических методик расчета критического диаметра детонации неоднородных

Таблица 1

Исходные данные для расчета критических параметров детонации

ВВ	ρ_0 , кг/м ³	$D = a + bu$		$p(l) = A/l^n$		$D(d)$		
		a , м/с	b	$A \cdot 10^{-9}$	n	D_i , м/с	L , 10 ⁻⁵ м	d_c , 10 ⁻³ м
Состав В	1720	2710	1.86	0.173	0.761	7859	2.84	3.88
PBX 9404	1840	2494	2.09	0.129	0.67	8776	0.89	1.106
ТНТ литой	1630	2794	1.555	2.754	0.32	6999	11.3	11
ТНТ пресс.	1630	2570	1.88	0.439	0.618	7045	6.1	1.14
PBX 9502	1896	3260	1.68	3.874	0.32	7706	19.4	0
ХТХ 8003	1500	1590	3.24	0.427	0.37	7260	0.191	0.222
Баротол	2610	2360	1.773	1.445	0.3	4874	102	8.72

высокоплотных зарядов смесевых взрывчатых составов [4].

Вычисление критического диаметра детонации по соотношению (1) требует знания кинетики разложения и уравнения состояния ударно-сжатого реагирующего ВВ. Использование в расчетах для вычисления начальной скорости разложения W так называемых формальных кинетик [1], а для вычисления $Q_{p,V}$ — подходящих аддитивных уравнений состояния, хотя и приводит к удовлетворительным количественным результатам, не является достаточно обоснованным, поскольку параметры W и $Q_{p,V}$ экспериментально не определяются. Однако в соотношении (1) величины W и $Q_{p,V}$ входят в виде обобщенной кинетической характеристики $K = \Gamma Q_{p,V} W$, которая может быть извлечена из данных динамических экспериментов с лагранжевыми измерительными преобразователями [5]. Экспериментальное получение таких данных весьма трудоемко [6], поэтому представляют интерес альтернативные методы определения K .

В настоящей работе обобщенная кинетическая характеристика разложения ВВ определяется с помощью экспериментально определяемой зависимости амплитуды ударной волны p от пройденного ею расстояния l при ударно-волновом инициировании заряда ВВ [7]. При этом используется приближение «единой» кривой, в соответствии с которым переход инициирующей ударной волны в детонационную осуществляется по единственной для данного заряда ВВ кривой в плоскости (p, l) независимо от начального давления [8]. В качестве «единой» кривой используются экспериментальные

зависимости $p(l)$. Эти зависимости аппроксимируются, как правило, выражением

$$p(l) = A_0 + \frac{A}{l^n}, \quad (2)$$

где A_0 , A и n — эмпирические постоянные, характеризующие данный заряд ВВ. В известных аппроксимациях обычно $A_0 = 0$. Приближение «единой» кривой до сих пор не имеет теоретического обоснования и эпизодически подвергается критике, поскольку результаты для коротких и длинных инициирующих ударных волн несколько различаются, но несмотря на это постоянно используется. Можно отметить одну из последних работ [9], в которой приближение «единой» кривой получило новую трактовку в рамках развиваемой в последнее время так называемой теории «детонационной ударно-волновой динамики (detonation shock dynamic)».

Процедура извлечения из (2) обобщенной кинетической характеристики K описана в [3]. Для ударной волны прямоугольного профиля эта процедура приводит к следующему выражению:

$$K = \frac{nAD}{a_H f_2(u) \rho} \left(\frac{p - A_0}{A} \right)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (3)$$

$$f_2(u) = \frac{D}{a_H D + \rho^2 c^2 / \rho_0}, \quad a_H = \rho_0 (a + 2bu),$$

где a , b — коэффициенты линейного уравнения ударной адиабаты ВВ $D = a + bu$. Для расчета критического диаметра с помощью соотношений (1) и (3) необходимо знать состояние ударно-сжатого ВВ, характеризуемого параметрами u , p , ρ и c , непосредственно за ударным скачком в самом начале зоны химической

реакции, где глубиной разложения ВВ можно пренебречь. Поэтому для их расчета 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 (10 ÷ 20 ГПа), то надобность в последнем замечании отпадает, поскольку разложение ВВ во фронте ударной волны (если оно имеет место) учитывается автоматически.

Для расчета скорости звука в ударно-сжатом веществе используется формула, предложенная в [10]:

$$c = \frac{[a + (b - 1)u](a + 2bu)}{a + bu}. \quad (4)$$

Угол наклона детонационного фронта φ_* , при котором течение за ударным фронтом на краю заряда становится звуковым, определяется из системы уравнений

$$\sin \varphi_* = D_n^2 / ((D_n - u)^2 (D_n + bu)^2 + 2D_n^3 u - D_n^2 u^2)^{1/2}, \quad (5)$$

$$D = \frac{D_n}{\sin \varphi_*}, \quad D_n = a + bu,$$

где D — скорость детонации, D_n — нормальная составляющая скорости фронта у поверхности заряда ВВ.

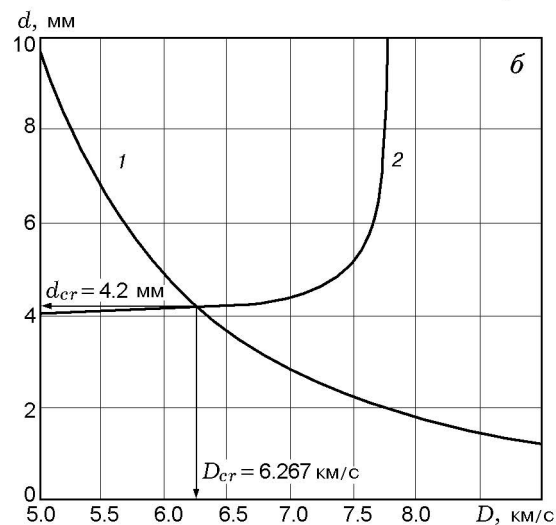
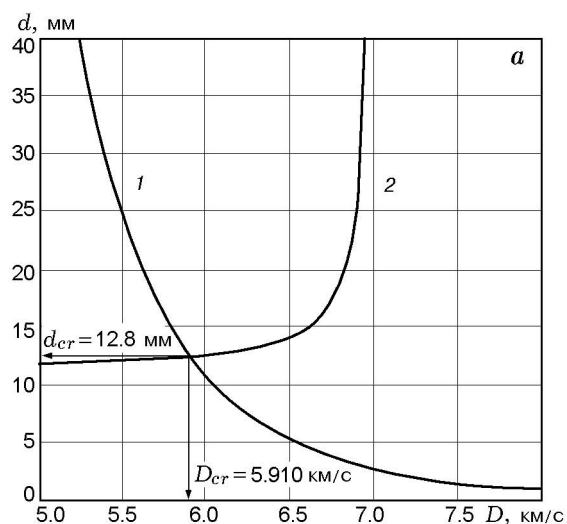
Соотношения (1)–(5) позволяют рассчитать критический диаметр детонации как функцию скорости детонации. По существу, соотношение (1) позволяет на плоскости «диаметр заряда d — скорость детонации D » построить кривую обрыва детонации $d_{cr}(D)$. Для вычисления критического диаметра детонации необходимо знать критическую скорость детонации D_{cr} , которая заранее неизвестна. Для определения критических параметров детонации можно воспользоваться зависимостями скорости детонации от диаметра. Критические параметры детонации d_{cr} и D_{cr} определяются в плоскости (d, D) координатами точки пересечения кривых $d_{cr}(D)$ и $D(d)$.

Зависимости $D(d)$ известны для широкого круга ВВ. Наиболее общей формой таких зависимостей является следующая [11]:

$$D(d) = D_i \left(1 - \frac{2L}{d - d_c} \right), \quad (6)$$

Таблица 2
Результаты расчетов и данные экспериментов

ВВ	φ_* , град	D_{cr} , м/с	d_{cr} , мм	
			расчет	эксперимент
Состав В	51	6 267	4.2	4.3
РВХ 9404	49	6 511	1.2	1.18
ТНТ литой	53	5 910	12.8	14.6
ТНТ пресс.	51	6 740	4.1	3 ÷ 5
РВХ 9502	53	7 220	6.4	9
ХТХ 8003	43	6 930	0.3	0.36
Баротол	51	4 117	22	43.6



Определение критических параметров детонации для литого ТНТ (а) и состава В (б):

1 — кривая обрыва детонации $d_{cr}(D)$, 2 — зависимость скорости детонации от диаметра заряда ВВ $D(d)$

где D_i — идеальная скорость детонации, L , d_c — эмпирические постоянные, характеризующие заряд ВВ.

С использованием изложенного подхода для ряда ВВ были определены критические параметры детонации. Соответствующие исходные данные, взятые из [7, 11–13], представлены в табл. 1, а результаты расчетов и соответствующие экспериментальные данные из [11, 12] — в табл. 2. На рисунке для некоторых ВВ приведены примеры характерного расположения кривых $d_{cr}(D)$ и $D(d)$.

Расчетные и экспериментальные значения d_{cr} в большинстве случаев удовлетворительно согласуются. Имеющиеся расхождения могут быть объяснены неточностью исходных данных. Так, например, среднее значение показателя n в зависимости (2), существенно влияющего на положение кривой $d_{cr}(D)$, дается с разбросом $0.03 \div 0.05$. Недостаточно точно известны также уравнения ударных адиабат в диапазоне детонационных давлений.

В целом, можно сделать вывод о том, что использование данных по ударно-волновому инициированию детонации для определения обобщенной кинетической характеристики разложения ВВ позволяет с помощью соотношения (1) с удовлетворительной точностью рассчитать критический диаметр детонации. При этом в описанном методе расчета используются только экспериментальные определяемые величины и зависимости: ударные адиабаты ВВ, зависимости $p(l)$ и $D(d)$. При известных критическом диаметре и критической скорости детонации по этому же соотношению (1) можно вычислить начальное значение обобщенного кинетического параметра разложения ВВ за сильными ударными волнами в диапазоне детонационных давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика взрыва:** В 2 т. 3-е изд. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Наука, 2002. Т. 1.
2. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных ВВ. Влияние оболочек // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 120–123.
3. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н.** Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Физматлит, 2004.
4. **Котомин А. А., Душенок С. А., Козлов А. С.** Критические диаметры детонации гетерогенных взрывчатых систем // Intern. Conf. «Shock Waves in Condensed Matter». СПб., 2004.
5. **Воробьев А. А., Трофимов В. С., Михайлюк К. М. и др.** Исследование инициирования детонации в литом тротиле динамическим методом. I. Постановка задачи и методика эксперимента // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 106–116.
6. **Воробьев А. А., Трофимов В. С., Михайлюк К. М. и др.** Исследование инициирования детонации в литом тротиле динамическим методом. II. Определение скорости звука и обобщенной кинетической характеристики // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 1. С. 14–22.
7. **Ramsay J. W., Popolato A.** Analysis shock wave and initiation data for solid explosives // The 4th Symp. (Intern.) on Detonation. White Oak, Maryland, 1965.
8. **Мейдер Ч.** Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
9. **Hill L. G., Gustavsen R. L.** On the characterization and mechanisms of shock initiation in heterogeneous explosives // The 12th Intern. Detonation. Symp. USA, 2002.
10. **Дремин А. Н., Канель Г. И.** Преломление фронта косою ударной волны на границе с менее жесткой средой // ПМТФ. 1970. № 3.
11. **Campbell A. W., Engelke R.** The diameter effect in high-density heterogeneous explosives // The 6th (Intern.) Symp. on Detonation. USA, Coronado, California, 1976.
12. **LASL Explosive Property Data / T. R. Gibbs, A. Popolato (Eds).** Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
13. **Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / V. M. Dobratz (Ed.).** Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1974, 1981.

Поступила в редакцию 6/XII 2004 г.