

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Макгайр, Д. Орнелъяс, И. Акт.— В кн.: Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.
2. С. L. Mader. Numerical modeling of detonations. University of California press, Berkeley, Los Angeles — London, 1979.
3. А. П. Ершов. ФГВ, 1975, 11, 6, 938.
4. В. В. Якушев, А. И. Дремин. Докл. АН СССР, 1975, 221, 1143.
5. А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков. ФГВ, 1974, 16, 6, 864.
6. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев. Докл. АН СССР, 1975, 225, 1086.
7. А. Г. Антипенко, В. В. Якушев.— В кн.: Детонация. Черногоровка, 1977.
8. А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков.— В кн.: Детонация. Черногоровка, 1977.

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Л. Кривченко

(Куйбышев)

Расчету скорости детонации посвящено значительное количество работ [1—6]. Предложенные методики расчета могут быть условно разделены на две группы: термодинамические [1—3] и классические [4—5]. Термодинамические методики основаны на нахождении той или иной зависимости скорости детонации от теплоты взрыва, состава продуктов детонации (ПД) и др. Классические основаны на решении системы уравнений из законов сохранения, условия Чепмена — Жуке и уравнения состояния в той или иной форме.

Как первые, так и вторые методики учитывают в основном лишь свойства ПД и не принимают во внимание тот факт, что фронт детонации (передняя граница зоны химической реакции) распространяется по непрореагировавшему ВВ и, следовательно, скорость детонации может быть в большой степени описана свойствами заряда ВВ.

В работе [6] в качестве дополнительного фактора, учитывающего свойства заряда, используется удельное число грамм-атомов в исходном ВВ. Однако данный фактор, хотя и учитывает химическую природу ВВ, не дает представлений о характере его физического влияния на параметры детонации.

Предположив, что из свойств заряда ВВ, связанных с распространением по нему детонационного фронта, в первую очередь влияние должны оказывать его волноводные свойства (такие, как скорость распространения звука), сделаем попытку провести оценку параметров детонации через данную характеристику и теплоту взрыва. Анализ скорости звука и скорости детонации позволяет установить некоторые закономерности их взаимосвязи. Например, нитрогуанидин и нитрат гидрозония, имеющие низкую теплоту взрыва (~ 800 ккал/кг) и высокую скорость звука (~ 3000 м/с) имеют высокую скорость детонации, а нитроглицерин, почти вдвое превосходящий по теплоте взрыва данные ВВ, но имеющий скорость звука ~ 1700 м/с, уступает им в скорости детонации.

Разделив влияние упругой и тепловой составляющих давления на скорость распространения фронта, можно выразить ее через суммарный волно-энергетический фактор. Волновую составляющую данного фактора характеризует скорость звука, а тепловую — энергосодержание в зоне химической реакции, определяющее массовую скорость.

Зависимость скорости распространения ударной волны от скорости звука и массовой скорости в виде обобщенной ударной адиабаты предложена в работе [7]:

$$D = 1,2c_0 + 1,7u_\phi,$$

где c_0 — скорость звука в исходном веществе; u_ϕ — массовая скорость на

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные скорости детонации ВВ предельной плотности

ВВ	ρ_0 , г/см ³	α	c_0 , м/с	$Q_m \cdot 10^{-3}$, Дж	D, м/с	
					расчет	экспе- рим.
ТНТ	1,66	0,36	2160	5317	7171	7100
Тринитротриаминобензол	1,93	0,4	2905	4840	8003	7990
ТНБ	1,69	0,44	2120	5701	7428	7430
Тетрил	1,73	0,48	2160	5998	7702	7750
ЭДНА	1,63	0,57	2610	5584	8019	8100
НГУ	1,77	0,5	3370	3875	8327	8300
Пикриновая кислота	1,77	0,52	2060	5454	7470	7650
Гексоген	1,8	0,67	2680	6320	8802	8800
Октоген	1,904	0,67	3010	6282	9319	9350
Дина	1,67	0,67	2420	6098	8143	8060
Тэн	1,77	0,86	2420	6354	8632	8500
Этиленгликольдинитрат	1,48	1,0	1570	6776	7490	7410
НГ	1,6	1,06	1690	6204	7667	7650
Мавитгексанитрат	1,75	1,125	1920	5881	8115	8270
Нитрат гидрозония	1,64	1,2	3310	3850	8584	8690

фронте процесса. Считаем, что фронт детонационной волны, распространяющейся по непрореагировавшему ВВ, фактически является фронтом ударной волны, а соотношение массовых скоростей на фронте и в плоскости Чепмена — Жуге равно 1,5, тогда уравнение для скорости фронта будет иметь вид

$$D = 1,2c_0 + 2,55u,$$

где u — массовая скорость в плоскости Чепмена — Жуге.

Свяжем массовую скорость ПД и максимальную теплоту взрыва следующей зависимостью:

$$u = \sqrt{\gamma Q_m},$$

где γ — коэффициент реализации максимальной теплоты взрыва. Известно, что γ , согласно данным [3], есть функция кислородного коэффициента α и плотности ρ_0 . Воспользовавшись экспериментальными данными [8] по массовым скоростям для тротила, тетрила, гексогена при плотностях, близких к предельным, и проводя некоторую коррекцию, получим выражение для коэффициента реализации

$$\gamma = (\alpha + 1,65)/5,5 \cdot \rho_0.$$

В табл. 1 приведены примеры расчета скоростей детонации для ВВ предельной плотности, а также экспериментальные значения данной характеристики по [9]. Видно, что наблюдается неплохая сходимость результатов расчета и эксперимента. Основные характеристики для расчета скорости звука и максимальной теплоты взрыва легко прогнозируются по методикам, предложенным в работах [3, 7].

Давление детонации p и показатель политропы процесса n можно рассчитать по следующим формулам:

$$p = \rho_0(1,2c_0\sqrt{\gamma Q_m} + 2,55\gamma Q_m),$$

$$n = 1,2c_0/\sqrt{\gamma Q_m} + 1,55.$$

Основная сложность существующих методов расчета параметров детонации состоит в описании их зависимости от плотности, для которого, как правило, пользуются формулой Кука

$$D_{\rho_0} = D - \mu(\rho - \rho_0),$$

где D_{ρ_0} — скорость детонации при плотности ρ_0 ; ρ — предельная плотность; μ — постоянный коэффициент. Природа коэффициента в формуле

Т а б л и ц а 2

Параметры детонации тротила и гексогена

ρ_0 , г/см ³	D , м/с		u , м/с		p , ГПа		n	
	эксп.	расчет	эксп.	расчет	эксп.	расчет	эксп.	расчет
ТНТ								
1,59	6910	6799	1610	1762	17,8	19,4	3,3	3,0
1,45	6500	6555	1510	1683	14,2	15,9	3,3	2,9
1,36	6200	6279	1450	1630	12,2	13,9	3,27	2,9
0,8	4340	4437	1050	1250	3,6	4,4	3,13	2,6
Гексоген								
1,72	8460	8530	2120	2136	30,85	31,35	3,0	2,97
1,6	8130	8140	2000	2060	26,0	26,8	3,06	2,95
1,46	7600	7660	1880	1960	20,8	22,0	3,05	2,9
1,29	7000	7034	1820	1850	19,52	21,2	2,85	2,8
0,95	5800	5755	1720	1594	9,46	8,7	2,37	2,6
0,56	4050	4064	1390	1237	3,16	2,8	1,92	2,3

Кука до конца не выяснена. Считается, что он зависит от кислородного коэффициента [2].

Согласно предлагаемому методу расчета параметров детонации, D зависит от Q_m , c_0 и γ , две последних характеристики зависят от плотности. Причем c_0 при конкретной плотности пропорциональна отношению текущей и предельной плотности. Поэтому расчет скорости детонации для зарядов любой плотности можно вести по формуле

$$D = c_0 \frac{\rho_0}{\rho} + 2,55 \sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5}} \rho_0 Q_m.$$

В табл. 2 приведены расчетные и экспериментальные параметры детонации по данным работы [8] для тротила и гексогена различных плотностей. Видно неплохое совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Некоторое расхождение массовых скоростей ($\sim 10\%$) для тротила, видимо, связано с неполной газификацией его продуктов детонации. Так как рассмотренный метод расчета неплохо описывает влияние ρ на D , то представляется возможным с его помощью выразить коэффициент в формуле Кука

$$\mu = 1,2c_0 \left(1 - \frac{\rho - 1,0}{\rho}\right) + 2,55 \left(\sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5}} \rho Q_m - \sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5}} (\rho - 1,0) Q_m \right).$$

Данный коэффициент зависит не только от кислородного коэффициента, но и от плотности ВВ, скорости звука и максимальной теплоты взрыва. Таким образом, предложенная методика расчета параметров детонации на базе легкопрогнозируемых характеристик позволяет с хорошей степенью точности определить эти параметры.

В рамках схемы возможен расчет смесевых ВВ по аддитивному методу. Метод расчета не пригоден для ВВ, детонирующих в пересжатом режиме.

В заключение автор выражает благодарность О. Ф. Гурьяновой за помощь в работе.

Поступила в редакцию 18/II 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. A. R. Martin, H. F. Jallop. Trans. Faraday Soc., 1958, 54, 257.
2. Г. А. Авакян. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ. М.: Изд-во Военно-инженерной академии им. Ф. Э. Дзержинского, 1964.
3. В. И. Пепелин, Ю. А. Лебедев. Докл. АН СССР, 1977, 234, 6, 1391.
4. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1960, 4, 54.
5. В. И. Зубарев, Г. С. Телегин. Докл. АН СССР, 1964, 158, 2, 452.
6. И. И. Айзенштадт. ФГВ, 1976, 12, 5, 754.

7. И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов. ФГВ, 1967, 3, 4, 585.
 8. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
 9. Б. Н. Кондриков, В. Н. Шаповал. Тр. МХТИ, 1979, № 104.

К ВОПРОСУ ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ АЗИДА СВИНЦА В ПРЕДПРОБИВНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ф. И. Иванов, М. А. Лукин, Л. Б. Зувев, Н. А. Урбан
 (Новокузнецк)

В работе [1], а также в более поздних исследованиях [2—4] инициирования азидов тяжелых металлов электрическим полем, предложено, что за инициирование детонации ответственны процессы ударной ионизации кристаллической решетки с последующей рекомбинацией продуктов ионизации. Однако в настоящее время существует и развивается совершенно иной подход к объяснению данного явления. Так, например, в работах [5, 6] отстаивается точка зрения, что электрополевое инициирование детонации происходит по классическому механизму теплового пробоя, т. е. за счет воспламенения Ленца — Джоулевым теплом.

В предлагаемой работе приводятся экспериментальные результаты, доказывающие нетепловую природу механизма инициирования детонации в азиде свинца.

Нитевидные кристаллы β -PbN₆ выращивали по методике [7]. Полученные кристаллы имели в поперечнике размеры $\approx 100 \times 15$ мкм, а в длину достигали 1,5—2 см. Нитевидные кристаллы выдерживали в предпробивных постоянном и импульсном электрических полях средней напряженностью 10^5 — 10^7 В/м. Длительность одиночного импульса варьировали от 200 до 3 мкс. Для предотвращения пробоя по поверхности образцы помещали в специальную ячейку, заполненную вазелиновым маслом.

Процессы предпробивного разложения в электрическом поле исследовались по методике [8] по удержанному решеткой газу и с помощью электронно-микроскопических исследований платиноуглеродных реплик, получаемых с поверхности кристаллов β -PbN₆ при их послойном травлении. Используемые методы позволили изучить топографию распределения газообразного (молекулярного азота) и твердого продуктов разложения, оценить их количество и форму зародышей металлического свинца, образующихся под действием электрического поля. Кроме того, метод платиноуглеродных реплик позволяет оценить с помощью декорирования поверхности, аналогично [9], размеры и форму областей локального усиления поля (доменов сильного поля (ДСП)), образующихся в образцах либо в приэлектродной области, преимущественно у анода, либо одновременно на деформационных дефектах кристаллической структуры (рис. 1).

Тожественность наблюдаемых картин декорирования поверхности кристаллов с ДСП доказывается независимыми измерениями напряженности электрического поля в этой области, осуществляемыми с помощью эффекта Келдыша — Франца [10] по сдвигу границы края спектра собственного поглощения в области ДСП в сторону больших длин волн (рис. 2). Оценка напряженности электрического поля проведена по формуле

$$\varepsilon = - \frac{4\sqrt{2m^*} (E_d - \hbar\omega)^{4/3}}{3e\hbar \ln [(1 - 10^{-\Delta D})/K_0]},$$

где $K_0 = [4\sqrt{\hbar\omega} (E_d - \hbar\omega)]/\hbar\omega$; $E_d = 3,6$ эВ — ширина запрещенной зоны кристалла; $m^* = 0,5m_0$ — эффективная масса поглощающих свет ча-