

ся в первом цикле сжатия. Амплитуда последующих скачков давления становится малой и структура волны сжатия не регистрируется.

В опытах с жидким водородом амплитуда скачков давления меняется более плавно и поэтому они хорошо различимы на осциллограммах. При использовании в качестве вещества прокладки пенополистирола с плотностью, равной плотности жидкого водорода, ступенчатая структура волны сжатия сглаживается ввиду большой пористости пенополистирола. Соответствие в пределах 10÷15% измеренных и рассчитанных давлений на первом (p_2) и втором (p_4) циклах сжатия можно считать удовлетворительным (см. таблицу). Значительное расхождение результатов измерения максимального давления с расчетом (p_{\max}) вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, оценка p_{\max} проведена с использованием ударных адиабат однократного сжатия и поэтому является верхней оценкой. Во-вторых, разгрузка вещества ударника из состояния I на ($p-u$)-диаграмме (см. рис. 4) во всех экспериментах успевала сказаться на процессе сжатия. Так, например, при $\tau=1,4$ мкс $T=1,1$ мкс, но к этому еще следует добавить время прохождения первой ударной волны по прокладке, равное $\approx 0,5$ мкс.

Поступила в редакцию
17/IX 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. P. N. Keeler, E. B. Royce. Proc. Int. School of Physics "Enrico Fermi", cours 48, ed. by P. Caldirola and H. Knoepfel, New York—London, Acad. press, 1971, p. 51.
2. Л. В. Альтшулер, Е. А. Дынин, В. А. Свидинский. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, 1.
3. R. S. Hawke, D. E. Duerge a. o. J. Appl. Phys., 1972, 43, 6.
4. J. Crosnier, J. Jacquesson, A. Migault. 4-th Symp. on Detonation Proc., U. S. Govt. Print. Off., 1965, p. 627.
5. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. В. Полюдов. ФГВ, 1972, 8, 4.
6. J. Jacquesson, J. P. Romain a. o. 5-th Symp. on Detonation Proc., Off. Naval Research Department of the Navy, Arlington, Virginia, 1970, p. 403.
7. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов. ЖТФ, 1973, XLIII, 9.
8. А. Н. Дремин, И. А. Карпухин. ПМТФ, 1960, 1.
9. R. G. McQueen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7.
10. Richard D. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.
11. M. van Thil, V. J. Alder. Molec. Phys., 1966, 10, 427.
12. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер и др. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 5.
13. И. П. Дудолоадов, В. И. Ракитин др. ПМТФ, 1969, 4.
14. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1973, 9, 3.

УДК 662.215.1

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ АЗИДА ГИДРАЗОНИЯ

Г. С. Яковлева, Р. Х. Курбангалина, Л. Н. Стесик
(Москва)

В работах [1, 2] начато изучение скорости детонации взрывчатых веществ (ВВ) с простым элементарным составом, где предметом исследования была жидкая азотистоводородная кислота (HN_3) и ее водные растворы. В данной работе приводятся результаты дальнейших исследований в этом направлении — экспериментальные данные о ско-

рости детонации азид гидразония при различных плотностях заряда.

Азид гидразония ($N_2H_4 \cdot HN_3$) при обычных условиях представляет собой очень гигроскопичное кристаллическое вещество с плотностью кристалла $1,40 \text{ г/см}^3$ и легко прессуется. При соприкосновении с накаливаемой проволокой порошок азид гидразония детонирует.

Необходимый для исследования азид гидразония получали по методу, описанному в работе [3], сливанием безводного раствора гидразина в этаноле с эфирным раствором азотистоводородной кислоты. Выпадающий в осадок азид гидразония промывался этиловым эфиром, освобождался вакуумированием от эфира и в дальнейшем хранился в эксикаторе над хлористым кальцием или пятиокисью фосфора. Содержание азид в готовом продукте определялось иодометрическим методом и составляло не менее $99,8\%$.

В связи с высокой гигроскопичностью азид гидразония все операции с ним (измельчение, прессование, снаряжение в оболочку) проводились в сухом боксе с использованием пятиоксида фосфора в качестве осушителя.

Синтезированный порошок азид состоял преимущественно из частиц с размерами $70\text{--}100 \text{ мк}$, содержание частиц менее 30 мк было незначительным. Более детальный анализ дисперсности не проводился. Для получения зарядов с плотностью $0,4\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$ азид измельчался в деревянной ступке.

Первые же опыты показали, что азид гидразония может детонировать как в высокоскоростном, так и низкоскоростном режимах. Поскольку основной задачей данного исследования было определение скоростей детонации, по возможности наиболее близких к идеальным, все приведенные ниже результаты относятся к детонации азид гидразония в высокоскоростном режиме.

Известно, что идеальная скорость детонации порошкообразных ВВ достигается в зарядах, диаметр которых в $5\text{--}6$ раз превышает критический диаметр устойчивой детонации. По этой причине на первом этапе исследований была определена зависимость величины критического диаметра детонации (d_*) от начальной плотности заряда ρ_0 в интервале $0,4\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$. В качестве оболочки зарядов использовались целлофан и стекло. Прессованные заряды в некоторых случаях испытывались без оболочек. Большинство зарядов для определения снаряжалось на открытом воздухе; готовые заряды выдерживались до испытаний над хлористым кальцием. Несомненно, что в этих условиях снаряжения азид успевал поглотить некоторое количество влаги. В связи с этим для контроля было проведено несколько опытов, в которых азид гидразония снаряжался в стеклянные оболочки в сухом боксе.

Результаты определения d_* представлены на рис. 1. Критический диаметр детонации азид гидразония растет с увеличением плотности заряда. Наличие некоторого количества влаги не оказывает решающего влияния. Это подтверждено экспериментами с зарядами сухого азид гидразония, помещенного в толстостенную стальную оболочку

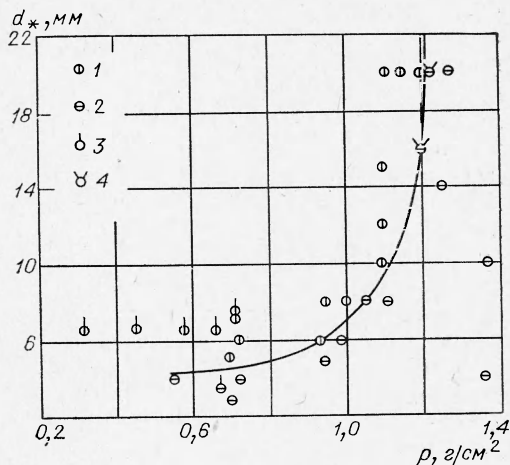


Рис. 1. Зависимость критического диаметра азид гидразония от плотности.

1, 2 — заряды воздушно-сухого азид гидразония в целлофане или без оболочки; 3 — заряды из сухого азид гидразония в стекле; 4 — заряды из сухого азид гидразония в бумажной оболочке.

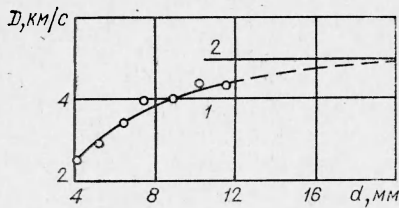


Рис. 2. Зависимость скорости детонации сухого азид гидразония от диаметра заряда (1) и оптимальная скорость детонации азид гидразония 4950 м/с в стальной трубке (2).

На рис. 2 показано изменение скорости детонации с диаметром заряда для сухого азид при плотности $0,68 \pm 0,02$ г/см³. Оболочками зарядов служили стеклянные трубки с толщиной стенок от 0,7 до 1,1 мм. В зарядах со стеклянными оболочками оптимальная скорость детонации может быть достигнута при диаметре около 20 мм, что составляет пять критических диаметров.

Изложенные выше результаты показывают, что для определения скоростей детонации, близких к идеальным, необходимо использовать заряды большого диаметра. Это требует значительного количества азид гидразония, обращение с которым небезопасно. В связи с этим измерения скоростей детонации проводились в зарядах, помещенных в оболочку из нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 и 20 мм, толщиной стенок 5–30 мм и длиной 150 мм. Внутренняя поверхность оболочек была полированной, чтобы между зарядом ВВ и стенкой канала не было зазора. По всей длине стальных трубок через 20 мм были просверлены радиальные отверстия диаметром 1,5 мм, через которые регистрировалось распространение детонации с помощью скоростного фоторегистратора.

Результаты определения скорости детонации в зависимости от плотности заряда приведены на рис. 3. Сплошная линия проведена по оптимальным значениям скоростей детонации, зафиксированным в наших условиях. Точки, лежащие ниже этой кривой, получены в условиях, когда диаметр заряда недостаточен для осуществления детонации с оптимальной скоростью. На этом же рисунке нанесены результаты расчета скоростей детонации на ЭВМ с использованием уравнения состояния идеального газа [5] при плотностях ВВ 0,01–0,05 г/см³ (см. таблицу). Экстраполяция экспериментальной кривой (штриховой участок) хорошо согласуется с результатами расчета. Эспериментальные значения скорости детонации, полученные в ин-

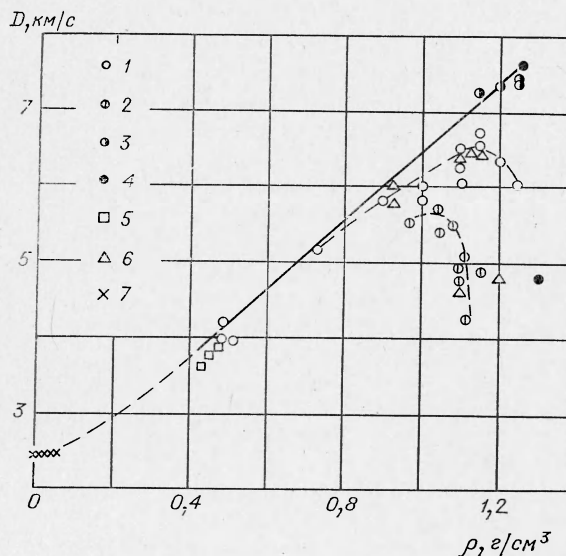


Рис. 3. Влияние плотности заряда на скорость детонации азид гидразония.

1 — стальная оболочка, внутренний диаметр/толщина стенки (D/T) 10/9,5 мм; 2 — стальная оболочка, D/T 10/5; 3 — стальная оболочка, D/T 20/20; 4 — стальная оболочка, D/T 20/30; 5 — стеклянная оболочка; 6 — без оболочки; 7 — расчетные данные.

Исследованное вещество	ρ , г/см ³	D , м/с	u , м/с	T , °К	p , атм
Азид гидразония	0,01	2460	1977	2699	262
	0,02	2465	1079	2708	526
	0,03	2467	1080	2712	790
	0,04	2468	1080	2714	1053
	0,05	2468	1081	2716	1318
Нитрат гидразония	0,01	2115	969	2971	203

тервале плотностей 0,45÷1,26 г/см³, удовлетворительно описываются формулой

$$D = 1,80 + 4,60\rho_0 \text{ км/с.}$$

Представляет интерес сопоставление кривой $D(\rho_0)$ для азид гидразония с аналогичными кривыми для других ВВ. Это сделано на рис. 4, где нанесены данные для гексогена [6], тэна [7], нитрата гидразония [8, 9] и стехиометрической смеси газообразных водорода и кислорода [10, 11]. Наиболее высокую скорость детонации имеет последнее из перечисленных ВВ. Это определяется высокой теплотой взрыва

и составом продуктов детонации этой смеси. Следующим по величине скорости детонации ВВ является азид гидразония, который превышает такие мощные ВВ, как гексоген и тэн. При распаде азид гидразония образуются главным образом азот и водород. Если пренебречь в первом приближении образованием аммиака и диссоциацией водорода, то теплота взрывчатого превращения азид гидразония практически равна его начальному теплосодержанию, которое составляет 58,9 ккал/моль, или 785 ккал/кг. Эта величина существенно ниже, чем теплота взрыва гексогена и тэна (1290 и 1360 ккал/кг [12]). Однако скорость детонации у азид гидразония выше. Дело в том, что средний молекулярный вес у продуктов детонации азид гидразония 15, тогда как у гексогена около 25, а у тэна около 29 (по приближенным уравнениям распада). Как известно, скорость детонации коррелирует с величиной $\sqrt{Q/\bar{\mu}}$ (Q — теплота взрыва, $\bar{\mu}$ — средний молекулярный вес продуктов).

Своеобразно ведет себя зависимость $D(\rho_0)$ для нитрата гидразония ($N_2H_5NO_3$). В частности, экстраполяция этой кривой на малые плотности плохо согласуется (в отличие от других ВВ) с расчетными данными. Теплота взрыва здесь не превышает 916 ккал/кг, а $\bar{\mu} = 21$, тогда как экспериментальные значения скорости детонации при $\rho_0 > 1$ г/см³ имеют неожиданно высокие, а при $\rho_0 < 1$ г/см³ — слишком низкие значения.

Необходимо дальнейшее исследование зависимости скорости детонации от начальной плотности при низких плотностях и для других конденсированных ВВ, так как таких данных в литературе пока недостаточно для серьезных заключений.

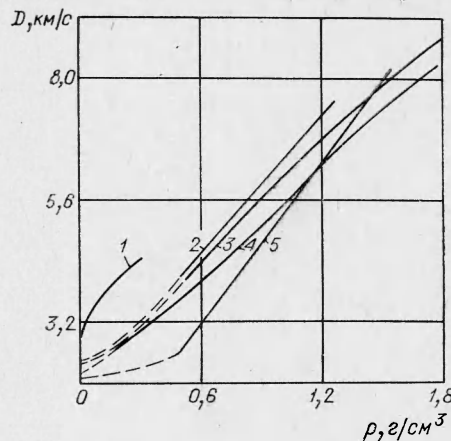


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от начальной плотности:

1 — стехиометрическая газообразная смесь $2H_2 + O_2$; 2 — азид гидразония; 3 — гексоген; 4 — тэн; 5 — мононитрат гидразония.

Помимо детонационных характеристик, в настоящей работе была определена чувствительность азида гидразония к удару на копке Каста в стандартных условиях (вес груза 10 кг, высота падения 25 см, навеска ВВ 0,05 г). Snаряжение приборчиков производилось в сухом боксе. Частота взрывов азида гидразония составляла 68%; в параллельных опытах с тетрилом — 56%.

Поступила в редакцию
10/XI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Яковлева, Р. Х. Курбангалина, Л. Н. Стесик. Докл. АН СССР, 1964, 156, 1, 152.
2. Р. Х. Курбангалина, Е. А. Пацков и др. ПМТФ, 1970, 4, 160.
3. A. L. Dresser, A. W. Brown, C. W. Mason. JACS, 1933, 55, 5—6, 1963.
4. Ю. И. Рубцов. Сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972, стр. 771.
5. Л. Н. Стесик. ФГВ, 1971, 7, 1, 111.
6. Л. Н. Стесик, Н. С. Шведова. ПМТФ, 1964, 4, 124.
7. H. C. Hornig, E. L. Lee a. o. The Fifth Symposium (International) on Detonation, Pasadena, California, August 18—21, 1970.
8. Donna Price T. P. Liddiard, R. D. Drost. US Government Research a. Development Reports, August, 1966, 112.
9. Р. Х. Курбангалина, Н. Н. Тимохин. ФГВ, 1970, 6, 4.
10. A. Schmidt. Z. Phys. Chemie, 1941, A189, 88.
11. W. A. Strauss, I. N. Scott. Combustion and Flame, 1972, 1, 141.
12. А. Я. Апин, А. Ф. Беляев, Г. С. Соснова. Сб. «Физика взрыва», № 2, Изд-во АН СССР, 1953.

УДК 552.1 : 531

СКОРОСТЬ ВОЛН РАЗГРУЗКИ В УДАРНО-СЖАТОМ ПОРИСТОМ NaCl

И. В. Белинский, А. Н. Струченко, Б. Д. Христофоров
(Москва)

При расчете действия взрыва в твердом теле необходимо знать как параметры динамического сжатия, так и особенности разгрузки среды за ударным фронтом. К настоящему времени проведены широкие исследования ударной сжимаемости сплошных и пористых материалов [1], однако их поведение при разгрузке изучено мало. На величину скорости волн разгрузки могут влиять пористость среды и прочностные эффекты. В связи с этим проведены измерения скорости волн разгрузки в ударно-сжатых образцах NaCl, в которых ранее исследовалось затухание плоских и сферических ударных волн [2, 3], в диапазоне давлений $30 \div 150 \cdot 10^8$ Н/м² сравнимых с прочностью. Большинство исследований в этом направлении проведено с металлами при давлениях свыше $100 \cdot 10^8$ Н/м² [4—9]. В работе [10] измерены скорости волн разгрузки за ударным фронтом в глинах и глинистых сланцах при давлениях до $500 \cdot 10^8$ Н/м².

Методика измерения скоростей звука в ударно-сжатом NaCl аналогична применявшейся в [10]. Исследуемые образцы цилиндрической формы диаметром 84 и 100 мм прессовались из порошка NaCl с размером зерен около 0,3 мм до плотности 1880 ± 10 и 2120 ± 5 кг/см³, что со-