

ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Strauss. AIAA J., 1968, 6, 9.
2. А. Б. Рыжик, В. С. Махин, В. Н. Кितिца. ФГВ, 1980, 16, 2.
3. J. L. Austing, A. J. Tulis, W. K. Sumida. Proc. 8-th Intern. Pyrotechn. Semin. Chicago, 1982.
4. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. П. Симонов. ЖТФ, 1956, 26, 8.
5. В. А. Левин, В. В. Марков. ФГВ, 1975, 11, 4.
6. С. А. Ждан, В. В. Митрофанов.— В кн.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черноголовка, 1980.
7. С. А. Ждан. ФГВ, 1976, 12, 4.
8. Sh. Eidelman, A. Burcat. 18-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst. Pittsburgh, 1981.
9. М. А. Гуревич, А. М. Степанов. ФГВ, 1968, 4, 2.
10. М. А. Гуревич, А. М. Степанов. ФГВ, 1968, 4, 3.
11. М. А. Гуревич, Г. Е. Озерова, А. М. Степанов.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
12. М. А. Гуревич, Г. В. Игнатов, Е. С. Озеров и др. ФГВ, 1969, 5, 3.
13. М. А. Гуревич, А. Я. Лукин, Г. П. Сиркунен и др. ПМТФ, 1977, 5.
14. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко и др. ИФЖ, 1973, 25, 3.
15. Л. П. Седов. Методы подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1965.
16. Дж. П. Борис, Д. Л. Бук.— В кн.: Управляемый термоядерный синтез. М.: Мир, 1980.
17. G. J. Pert. J. Comput. Phys., 1983, 49, 1.
18. P. A. Urtiev, A. K. Oppenheim. 11-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst. Pittsburgh, 1967.
19. В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1980, 16, 3.

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИИ НИТРОМЕТАНА И РАСТВОРА НИТРОМЕТАНА С БРОМОФОРМОМ

М. Ф. Гоголя, Н. Г. Демченко
(Москва)

При построении уравнения состояния продуктов детонации (ПД) наиболее часто используют кинематические параметры: скорость детонации D , массовую скорость u и давление p . Однако температура ПД T наиболее чувствительна к виду уравнения состояния и к значениям входящих в него коэффициентов.

Экспериментально температура продуктов нормального режима детонации наиболее просто измеряется оптическим методом в прозрачных средах — жидкостях, расплавах, агатированных зарядах или кристаллах ВВ, т. е. получается информация только в одной или двух точках по давлению для одного вещества. В некоторых случаях (при относительно низких давлениях) можно определить T и в непрозрачных средах. Для этого на исследуемый заряд вплотную помещают прозрачный экран из материала, имеющего близкий к ПД акустический импеданс. Если ударная волна (УВ), которая распространяется по экрану, не приводит к потере его прозрачности, появляется возможность получить информацию о температуре ПД. В работе [1] такой прием использован для измерения T малоплотных зарядов тэна и тротила.

Существенно расширить диапазон температур можно при создании пересжатых режимов детонации. В случае прозрачных ВВ находится величина зависимости температуры ПД от давления в широком диапазоне, что наряду с измерением кинематических параметров дает основу для построения уравнения состояния ПД. В связи с этим в настоящей работе экспериментально определены температуры и кинематические параметры продуктов пересжатой детонации нитрометана в диапазоне $p = 12,9 \div 36$ ГПа и раствора нитрометана с бромформом (50/50) при $p = 11 \div 74$ ГПа, а также состояния на ударных адиабатах продуктов пересжатой детонации этих систем.



Рис. 1. Экспериментальные сборки для исследования пересжатой детонации.

Пересжатые режимы детонации создавались двумя способами. В первом пересжатие достигалось за счет удара по исследуемому ВВ алюминиевой пластины, разогнанной ПД заряда ВВ (рис. 1, а). Зная скорость полета пластины и измеряя с помощью скоростного фоторегистратора скорость пересжатой детонации, определяем p и u в пересжатом режиме.

Естественно, что база измерения скорости выбиралась так, чтобы не было влияния волны разгрузки с тыльной поверхности ударника. Точность определения скорости пересжатой детонации составляла 100—150 м/с.

Во втором варианте пересжатые режимы создавались за счет маховского взаимодействия сходящихся копических детонационных волн (ДВ) (рис. 1, б). Исследуемое ВВ помещалось в цилиндрическую оболочку из более мощного ВВ. При подрыве генератором плоского фронта экспериментальной сборки в канале, заполненном исследуемым веществом образуется в конечном итоге стационарная по времени маховская конфигурация. (Более подробно об этом см. работы [2, 3], где определены времена образования стационарного маховского диска и его размеры в зависимости от геометрии и материала оболочки.) Маховский диск, формирующийся при взаимодействии ДВ, распространяется со скоростью, равной скорости детонации использованной оболочки. В качестве материала для оболочек использованы: ТНТ, ТГ50/50, ТГ36/64, композиция на основе октогена и нитрометан со скоростями детонации $D = 6,7; 7,65; 8,0; 8,4$ и $6,3$ км/с соответственно. Цилиндрические оболочки имели внешний диаметр 40, внутренний 20 и высоту около 60 мм. Только, когда оболочка готовилась из нитрометана, эти размеры составляли соответственно $60 \div 90, 20$ и 80 мм.

Такой способ получения пересжатых режимов детонации относительно прост, не требует измерения на малых базах скорости пересжатой детонации. Кроме того, время существования таких режимов можно варьировать в относительно широких пределах. Чтобы определить состояние в пересжатой детонации, необходимо измерить еще один параметр — давление или массовую скорость. Прямое нахождение этих величин связано с существенными трудностями. Поэтому в работе определялись состояния в различных (по динамическим жесткостям) средах, т. е. на ударной адиабате продуктов пересжатой детонации. Для этого на торец заряда помещали металлическую кювету, в которую наливали индикаторную жидкость с известной зависимостью температуры ударного фронта от давления (рис. 1, в). Геометрические размеры кюветы и оболочки подбирали таким образом, чтобы диаметр маховского диска был больше диаметра основания кюветы, высоту кюветы — с учетом разновременности выхода на торец заряда фронтов детонации в оболочке и в центре канала. Толщина дна кюветы ~ 1 мм.

Температуры ПД и ударных фронтов в индикаторных жидкостях измеряли с помощью электрооптической установки на двух длинах волны (420 и 750 нм). Для приема излучения использовали фотоэлектронные умножители ФЭУ-119 и ФЭУ-92, фототок с которых регистрировался на осциллографах С1-74 и ОК-33. Градуировку проводили по температуре продуктов нормальной детонации нитрометана, которая принималась равной 3700 К. Это значение взято из работ [4—8], где

установлено, что ПД нитрометана излучают как серое тело, причем цветовые температуры практически совпадают с яркостными. Это дает основание предполагать, что измеренные в данной работе яркостные температуры продуктов пересжатой детонации близки к истинным. Полученные в разных областях спектра значения температур совпадают в пределах ошибки измерения.

В работе использовались индикаторные жидкости: CCl_4 [9], гексан и толуол [10] и кюветы из меди [11] и алюминиевого сплава [12]. (В [9–12] определены ударные адиабаты указанных веществ.) T – p зависимости строились на основании работ [13, 14] в виде $T = 180 + 135p$ для CCl_4 , $T = 402,5 + 79,4p$ для толуола и $T = 498,5 + 65,74p$ для гексана. По измеренной яркости излучения фронта ударной волны (УВ), распространяющейся по индикаторной жидкости, находилось давление. При известных давлениях в жидкости, ударных адиабатах жидкости и материале кюветы определялось состояние в дне кюветы, которое лежит на ударной адиабате продуктов пересжатой детонации. Вместе со скоростью детонации оно использовалось при определении p и u . При этом применялись выражения из [15], в которые как параметр входит показатель политропы n . Оказалось, что на результаты расчета его изменение влияет слабо.

Это можно проследить на следующем примере. В алюминиевом экране при скорости пересжатой детонации нитрометана $7,65$ км/с $p = 53,4$ ГПа, $u = 2,33$ км/с. Пересчет этого состояния на начальные параметры пересжатой детонации при $n = 2,5$ приводит к значениям $p = 31,9$ ГПа, $u = 3,66$ км/с, а при $n = 3$ $p = 31,4$ ГПа, $u = 3,60$ км/с, т. е. изменение n на 20% приводит к снижению давления на 0,5 ГПа, что составляет 1,6%. Эта ошибка существенно меньше экспериментальной погрешности, поэтому при пересчете состояний, лежащих на ударных адиабатах продуктов пересжатой детонации, на состояние пересжатой детонации для нитрометана использовалось значение $n = 2,5$, а для раствора $n = 3$.

Когда пересжатие достигалось за счет маховского взаимодействия, кроме металлических кювет на торец заряда помещали набор плексигласовых пластин, разделенных воздушными зазорами размером 0,08 мм. Регистрируя на СФР процесс, определяли скорость УВ в плексиглазе, а затем, зная ударную адиабату [16] и используя указанные выше выражения [15], — состояние в продуктах пересжатой детонации. Так как существует разновременность выхода на торец заряда маховской конфигурации и детонационного процесса по оболочке, то возможно, что измеренная скорость УВ в плексиглазе и соответствующий пересчет будут давать несколько заниженные значения параметров пересжатой детонации. Однако анализ совокупности экспериментальных данных (см. таблицу) и использованных методик указывает на то, что точность определения давления пересжатой детонации составляет 6–7%.

Введение бромформа в нитрометан приводит к падению скорости детонации и к уменьшению температуры ПД. В растворе нитрометана с бромформом 50/50 скорость детонации снижается на 1,1 км/с, а температура ПД до 3400 К из-за изменения теплоемкости раствора.

Параметры пересжатой детонации нитрометана измерялись в работе [17] при скоростях 7,0 и 7,1 км/с. Давление и массовые скорости хорошо коррелируют с полученными в настоящей работе, а температура продуктов пересжатой детонации выше. Кроме того, температуры, регистрируемые в разных областях спектра, отличались. Такое расхождение, по-видимому, связано с выбранным в [17] коэффициентом поглощения нитрометана, который необходимо было вводить, так как регистрация температуры продуктов пересжатой детонации проводилась через слой еще не прореагировавшего нитрометана.

Из результатов настоящей работы следует, что температура продуктов пересжатой детонации связана с давлением следующими выражениями: $T = 3700 + 16,32(p - p_0)^{1,26}$ — для нитрометана и $T = 3400 +$

Исследуемое вещество	Параметры перешагнутой детонации				Материал экрана	Состояние в экране		Индикаторная жидкость	Способ получения перешагания
	D , км/с	T , К	u , км/с	p , ГПа		p , ГПа	u , км/с		
Нитрометан ($\rho_0 = 1,14$ г/см ³)	6,3	3700+100	1,80	12,9	—	—	—	—	Нормальный режим
	6,5	3850+100	2,44	18,1	—	—	—	—	Метанне
	6,7	3900+100	2,72	20,8	ПММА	21,3	2,70	—	Маховское взаимодействие
	7,2	4150+150	3,24	26,5	—	—	—	—	Метанне
	7,3	4200+150	3,38	28,1	—	—	—	—	»
	7,65	4400+200	3,70	32,3	Cu	75,3	1,39	CCl ₄	Маховское взаимодействие
	7,65	4400+200	3,66	31,9	Al	53,4	2,33	C ₆ H ₁₄	»
	7,65	4400+200	3,53	30,8	ПММА	31,7	3,49	—	»
	8,0	4500+200	3,99	36,6	—	—	—	—	Метанне
	8,0	4600+200	4,00	36,5	Al	62,2	2,55	C ₇ H ₈	Маховское взаимодействие
8,0	4600+200	3,68	33,6	ПММА	33,8	3,63	—	»	
Нитрометан + бромформ 50/50 ($\rho_0 = 1,64$ г/см ³)	5,2	3400+100	1,30	11,1	—	—	—	—	Нормальный режим
	6,3	3700+100	3,00	31,0	—	—	—	—	Маховское взаимодействие
	7,65	5200+200	4,51	56,6	Cu	141,0	2,21	C ₇ H ₈	»
	7,65	5200+200	4,30	54,0	ПММА	46,3	4,41	—	»
	8,0	5750+200	4,63	60,7	Cu	147,5	2,30	C ₇ H ₈	»
	8,0	5750+200	4,72	61,9	ПММА	56,1	4,95	—	»
	8,4	5750+200	5,36	73,8	ПММА	68,3	5,56	—	»

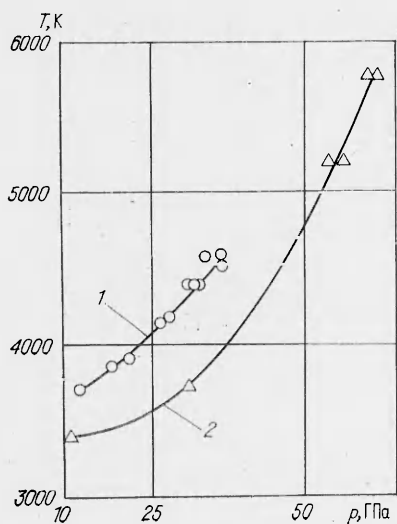


Рис. 2. T — p -зависимости продуктов перешагнутой детонации для нитрометана (1) и раствора (2); точки — эксперимент.

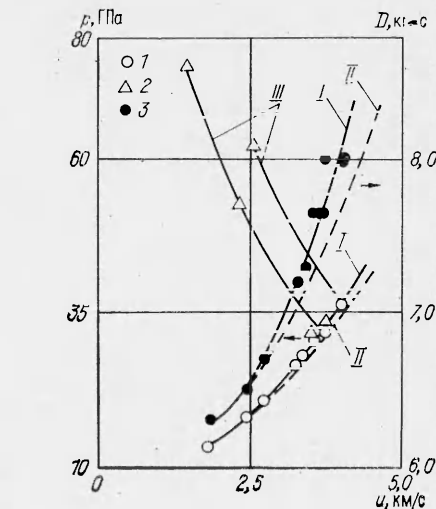
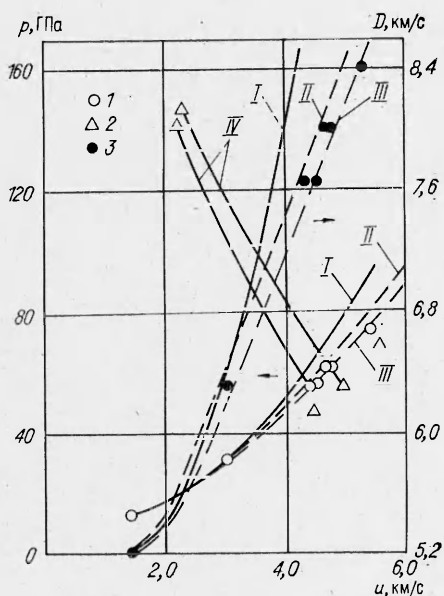


Рис. 3. Зависимости давления и скорости детонации от массовой скорости для продуктов перешагнутой детонации нитрометана.

I — ударная адиабата продуктов нормальной детонации; II — изоэнтропа; III — ударная адиабата продуктов перешагнутой детонации; $1-3$ — экспериментальные значения давлений на ветви перешагнутой детонации, на ударной адиабате продуктов перешагнутой детонации и скорости перешагнутой детонации.

Рис. 4. Зависимости давления и скорости детонации от массовой скорости продуктов перешагнутой детонации смеси нитрометана с бромформом.

I — ударная адиабата продуктов нормальной детонации; II, III — изоэнтропы при $n = 3,0$ и $n = 2,7$; IV — ударная адиабата продуктов перешагнутой детонации ($1-3$ см. на рис. 3).

$+ 0,77(p - p_J)^{2,06}$ — для раствора (где p_J — давление в точке Жуге). Зависимости хорошо коррелируют с экспериментальными значениями (рис. 2).

Сравним экспериментальные значения с рассчитанными. Расчет параметров перешагнутой детонации проводился в предположениях, что состояние конечных продуктов при любом режиме детонации описывается единой изоэнтропой $p = p_J \sigma^n$, где $\sigma = v_J/v$, v — удельный объем, и что ветвь перешагнутой детонации лежит на ударной адиабате продуктов нормальной детонации; $n = 2,5$ для нитрометана и $n = 2,7 \div 3,0$ для раствора (рис. 3). Для нитрометана отличие между ударной адиабатой и изоэнтропой при $u = 4$ км/с составляет по давлению $\sim 6\%$, а по скорости детонации $\sim 5\%$, хотя экспериментальные результаты лучше коррелируют с ударной адиабатой. Для раствора наблюдается обратная картина: экспериментальные значения лежат между двух изоэнтроп, построенных с $n = 2,7$ и $3,0$ (рис. 4).

Поступила в редакцию 12/XII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Акимова, М. Ф. Гоголя, В. П. Галкин. ФГВ, 1978, 14, 2, 135.
2. М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, П. Г. Демченко. ФГВ, 1981, 17, 1, 153.
3. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, А. Ю. Долгобородов. ФГВ, 1981, 17, 5, 133.
4. F. C. Gibson, M. Bowser. J. Appl. Phys., 1958, 29, 4, 628.
5. И. М. Воскобойников, А. Я. Аппи. Докл. АН СССР, 1960, 130, 4, 804.
6. В. П. Кологривов, А. А. Анчуров. УФН, 1964, 9, 236.
7. В. С. Трофимов, А. В. Троян. ФГВ, 1969, 5, 280.
8. P. A. Person, T. Siglin. 5-th Symp. on Detonation. Naval ordnance research, 1970.
9. R. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.
10. R. Dick. J. Chem. Phys., 1979, 71, 8.
11. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, П. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53, 1967.
12. R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor et al. High — Velocity Impact Phenomena. N. Y.: Academic Press, 1970.
13. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. П. Афанасенков и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 4, 807.
14. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя. Хим. физика, 1982, 3, 423.
15. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станкович и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
16. M. van Thiel. Compendium of shock wave data. Univ. California, Livermore, 1966.
17. И. М. Воскобойников, А. П. Афанасенков. — В кн.: Взрывное дело. — № 75/32. М.: Недра, 1975.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПЬЕЗОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

*В. М. Шунин, А. Г. Ангипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев,
Е. Г. Андрианов, Т. Т. Еремеева, В. В. Климов, Р. Г. Стец
(Черноголовка)*

Пьезоэлектрические материалы (например, кварц, керамика) широко используются в качестве рабочего тела датчиков давления [1—3], а также являются эффективными преобразователями энергии взрыва в электрическую энергию [2, 4]. Однако применение этих материалов часто ограничивается вследствие их хрупкости, трудности получения сложных геометрических конфигураций и т. п. Поэтому представляют интерес разработка и исследование конструкционных материалов, которые могут иметь высокую пьезоактивность керамики и в то же время обладать рядом существенных преимуществ, в частности, технологичностью в изготовлении, более высокими механической прочностью к ударным воздействиям, пластичностью и др.

В последние годы начали интенсивно разрабатывать и изучать композиционные пьезокерамические составы различных типов [5—11]. Разнообразие пьезокомпозитивов как по методам получения, так и по свойствам вызвано широким диапазоном их применения. Согласно [11], перспективны композиты, состоящие из смеси порошкообразной сегнетокерамики с полимером, вследствие довольно простой технологии изготовления, возможности использования отходов пьезокерамического производства, легкости получения эластичных пьезоэлементов. Меняя соотношения наполнителя и связующего в этих составах, можно варьировать электрические и механические свойства образца. С целью выяснения областей возможного использования таких материалов в динамических экспериментах представляется целесообразным исследовать электрические явления, возникающие в них под действием ударных волн.

Исследуемые материалы. Изучены композиционные пьезокерамические материалы, которые представляют собой механическую смесь порошкообразной керамики цирконат-титанат свинца ЦТС-19 и сополимера винилденфторида с тетрафторэтиленом (Ф-42). Выбор этого полимера в качестве связующего обусловлен его достаточно высокой диэлектрической