

6. Т. Томас. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М., «Мир», 1964.
7. E. K. Rideal, A. I. Robertson. Proc. Roy. Soc., 1948, A195, 135.
межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, Изд-во ОГУ, 1969.
8. В. С. Логачев, П. Ф. Похил, А. С. Дмитриев. Матер. 9-й республиканской М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947, стр. 149.

УДК 662.215.1

О ДЕТОНАЦИИ НАПОЛНЕННЫХ ВВ В ЗАРЯДАХ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Г. В. Димза
(Москва)

Исследованию детонации в зарядах, диаметры которых близки к критическим, посвящено много работ. Предполагается, что в жидких ВВ и монокристаллах процесс развивается по механизму адиабатического теплового взрыва [1, 2]. Величина критического диаметра детонации $d_{кр}$ должна быть такой, чтобы время реакции $\tau_{кр}$, [3].

$$\tau \leq \frac{2d_{кр}}{3D_{кр}}, \quad (1)$$

было сопоставимо с временем задержки адиабатического теплового взрыва для данного ВВ в соответствующих условиях сжатия (т. е. при тех же давлениях, которые развиваются при детонации в критических условиях).

В порошкообразных и пористых ВВ разогрев от сжатия волной обычно недостаточен для осуществления объемной химической реакции, и считается, что превращение их в детонационный волне может принимать форму взрывного горения [4]. В последнем случае, помимо разогрева за счет ударного сжатия, существенное влияние на время завершения процесса оказывает плотность заряда, размер частиц ВВ, наличие примесей, и т. д. Твердо установленный факт влияния размера зерна ВВ на величину критического диаметра детонации считается одним из основных доводов в пользу механизма взрывного горения. Однако многое в процессе до настоящего времени является дискуссионным, и мнения по этому вопросу существенно различаются.

В этой связи следует остановиться на работах А. Н. Дремина с сотрудниками [2, 5, 6], где описаны опыты по определению с помощью электромагнитной методики времени реакции при детонационном превращении в зарядах разных диаметров (близких, значительно больших и критических) для ряда ВВ, в том числе тротила и гексогена с разным размером частиц. Разницы во временах химической реакции у исследованных ВВ с сильно различающимися размерами зерен при условии одинаковых давлений детонации замечено не было. Последнее объяснено выравниванием условий процесса в результате дробления зерен ударной волной до одинаковой, минимальной, величины с последующим тепловым взрывом мелких частиц (авторы называют предложенную схему механизмом «очагового теплового взрыва»). Ими же показано, что дробление зерна ВВ происходит уже при воздействии волны с амплитудой 1,5—2,0 кбар. В итоге авторы ставят под сомнение возможность протекания процесса по механизму взрывного горения, предполагающего сгорание зерен с поверхности вглубь.

Не претендуя на полное решение вопроса, сделана попытка экспериментально оценить влияние некоторых, взятых в отдельности, физических факторов на процесс детонации в критических условиях.

Исходя из теории взрывного горения, целесообразно было еще раз просмотреть влияние плотности, пористости, размеров зерна и добавок к ВВ на развитие детонации. Исследования проводились на гексогене с парафином в качестве наполнителя (реже с тальком и алюминием), отдельные серии опытов ставились на тротиле. Выбранные добавки должны были обеспечить разную структуру зарядов; тальк и алюминий при разном их содержании — способствовать получению зарядов разной плотности, пористости и проницаемости; парафин, кроме того, обволакивая зерна ВВ — отсекает непосредственное действие газов взрыва на частицы ВВ. Чтобы уменьшить число переменных, содержание ВВ в единице объема сохранялось постоянным и равным 1 г/см^3 . Взрывчатые вещества патронировались в целлофановую оболочку длиной не менее 10 диаметров заряда. Скорость детонации измерялась на СФР-2М. Исследования велись на заводском порошке гексогена и монокристаллах, которые дробились и рассеивались на отдельные ситовые фракции с размером частиц от 0,1 до 0,85 мм, а также на измельченном чешуирированном тротиле. Применение монокристаллов предполагало большую определенность физических свойств используемого ВВ.

На рис. 1 показано, как меняется критическая скорость детонации $D_{кр}$ в зависимости от содержания инертного наполнителя, выраженного через пористость зарядов. Прямая I соответствует смесям на базе заводского гексогена со средним размером частиц 0,1 мм, прямая II — на базе измельченного чешуирированного тротила со средним размером частиц 0,1 мм. Инертные добавки: 1 — парафин, 2 — тальк, 3 — алюминий. Характер изменения $D_{кр}$ с увеличением содержания наполнителя одинаков для заводского гексогена и измельченного чешуирированного тротила. Оказалось, что $D_{кр}$ не зависит от свойств добавки и связана с пористостью зарядов. В табл. 1 даны найденные экспериментально величины критических диаметров и критических скоростей детонации, а также расчетные давления детонации, полученные из соотношения $p_{кр} = 0,22 \rho D_{кр}^2$ [7]. Кроме того, по соотношению (1) определено значение $\tau_{кр}$ для заводского гексогена с парафином и в табл. 2 приведены эти же данные для смесей тротила с парафином. В табл. 3 представлены полученные из эксперимента значения $d_{кр}$ и $D_{кр}$ и рассчитанные $p_{кр}$ и $\tau_{кр}$ для монокристаллического гексогена с размером зерна от 0,1 до 0,85 мм и разным содержанием парафина.

Обращает внимание разница в характере изменения $D_{кр}$ с увеличением содержания наполнителя для заводского и монокристаллического зерна гексогена. Для наглядности данные табл. 1 и 3 совмещены на одном графике (рис. 2). Обозначения на рис. 2: 1 — гексоген заводской, средний размер частиц 0,1 мм — гексоген монокристаллический, средний размер частиц, мм: 2—0,1; 3—0,2; 4—0,35; 5—0,5; 6—0,85. При малых содержаниях наполнителя (пористость зарядов более 2%) значения $D_{кр}$ у

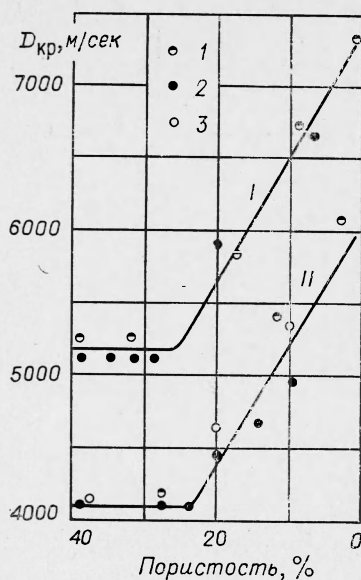


Рис. 1.

Таблица 1

Состав смеси, вес. %		Плотность заряда, г/см ³	Пористость, %	$d_{кр}$, мм		$D_{кр}$, м/сек	$\tau_{кр}$, мсек	$p_{кр}$, кбар
гексоген	парафин			затухает	проходит			
95	5	1,05	38,7	4	5	5250	0,63	63,7
90	10	1,1	32,3	4	5	5250	0,63	66,7
85	15	1,16	27,6	—	5	5360	0,62	73,3
80	20	1,25	16,7	3,8	5	6200	0,54	105,6
76	24	1,32	9,4	3,8	5	6730	0,5	131,0
72	28	1,39	1,2	3,8	5	7300	0,45	163

Таблица 2

Состав смеси, вес. %		Плотность, г/см ³	Пористость, %	$d_{кр}$, мм		$D_{кр}$, м/сек	$\tau_{кр}$, мсек	$p_{кр}$, кбар
тротил	парафин			затухает	проходит			
90	10	1,1	28,2	12	15	4500	2,2	49,0
80	20	1,25	12,0	12	15	4450	1,82	54,4
75	25	1,33	3,0	15	17	6330	1,79	116,8

Таблица 3

Состав смеси, вес. %		Размер зерна гексогена, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %	$d_{кр}$, мм		$D_{кр}$, м/сек	$\tau_{кр}$, мсек	$p_{кр}$, кбар
гексоген	парафин				затухает	проходит			
90	10	0,2	1,1	—	9	10	5200	0,9	—
80	20	0,1	1,25	16,7	7	8	5200	0,9	80
		0,2	1,25	16,7	8	9	5280	1,1	80
		0,35	1,25	16,7	12	15	5300	1,9	80
		0,5	1,25	16,7	15	20	5340	2,5	—
		0,85	1,25	16,7	20	25	5400	3,1	—
72	28	0,1	1,39	1,2	8	9	—	—	—
		0,2	1,39	1,2	9	10	—	—	—
		0,35	1,39	1,2	12	15	5300	1,9	87
		0,5	1,39	1,2	15	20	5300	2,5	87
		0,85	1,39	1,2	20	25	5570	3,0	97

заводского порошка и у монокристаллов постоянные и ложатся на общую горизонтальную прямую. С увеличением содержания наполнителя прямые расходятся, и для смесей заводского гексогена прямая круто поднимается вверх. Во всех случаях (как для заводского гексогена, так и для тротила с различными добавками) возрастание $D_{кр}$ начинается при пористости зарядов $\sim 20\%$.

Возрастание $D_{кр}$ с увеличением содержания инертной добавки нельзя объяснить увеличением местной плотности ВВ при замене воздуха в заряде на инертное вещество, поскольку, как следует из эксперимента, для монокристаллического зерна при любом содержании парафина $D_{кр}$ остается постоянной. Далее, на примере зависимости $d_{кр}$ и $\tau_{кр}$ от размера зерна l для смеси монокристаллического гексогена с парафином (табл. 3, рис. 3) подтверждается, что существует прямая пропорциональность между размером зерна и временем реакции, что наблюдалось и ранее [8] в водонаполненных системах и соответствует модели горения зерна с поверхности вглубь. Изменение характера процесса в случае заводского гексогена (перегиб прямой) происходит при давлениях 65—70 кбар. Если причиной возрастания скорости детонации было бы дробление зерен, как это утверждается в работах [2, 5, 6], то при тех сравнительно высоких давлениях, которые развиваются при детонации исследованных ВВ в критических условиях, не должно быть разницы между монокристаллическими и поликристаллическими зёрнами.

С другой стороны значения $\rho_{кр}$ и $\tau_{кр}$ во всех исследованных случаях значительно ниже величин, необходимых для протекания в зернах гомогенной реакции по типу адиабатического теплового взрыва [9]. Остается предположить, что нарушение послойного горения связано с дополнительной реакцией в очагах внутри зерна. Ими могут являться неоднородности (пустоты, микропоры, дислокации), имеющиеся в заводском зерне гексогена и в чешуированном тротиле, являющемся по существу поликристаллическим¹.

Разница в поведении заводских зерен и монокристаллов гексогена отчетливо видна на рис. 4, где представлена зависимость скорости детонации от диаметра заряда смесей гексогена с 20% парафина ($\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$). Размер зерна в обоих случаях 0,2 мм. Кривая 1 относится к заводскому гексогену, 2 (взята из работы [10]) — к монокристалльному веществу. Существенно отметить разный характер достижения идеальной скорости у этих двух во всех остальных показателях одинаковых систем. Можно предположить, что в развитии детонации у изученных

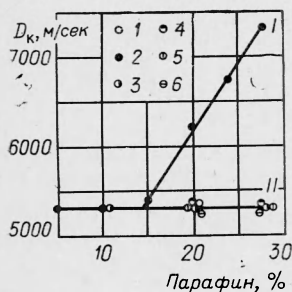


Рис. 2.

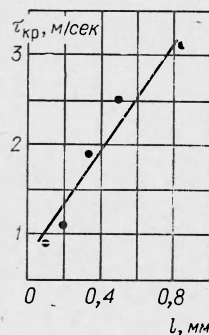


Рис. 3.

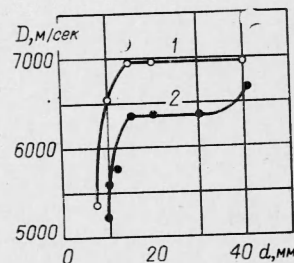


Рис. 4.

¹ Роль воздушных включений при детонации водонаполненных систем отмечалась, в частности, в работе [8].

систем помимо поджигания зерен с поверхности существенное значение имеют перемещения вещества внутри самих зерен. В определенных условиях перемещения могут стать источниками дополнительных очагов разогрева и реакции внутри зерна. Наличием этой стадии легче всего объяснить полученную разницу в поведении зарядов из монокристалльного зерна гексогена и зарядов, изготовленных из зерен с дефектами.

Выводы

1. Экспериментально исследованы закономерности изменения критических диаметров и критических скоростей детонации от плотности, пористости зарядов, размера и качества зерна ВВ в системах, содержащих взрывчатое вещество и инертный наполнитель. Обнаружена четкая разница в величинах критических скоростей детонаций в случае монокристалльных зерен гексогена и заводских порошков.

2. Для монокристалльного зерна гексогена с наполнителем (парафином) характерно постоянство критической скорости детонации ($D_{кр} \approx 5300$ м/сек). Последняя независима ни от размера зерна (в исследованных пределах от 0,1 до 0,85 мм), ни от содержания наполнителя. Кроме того, имеет место пропорциональность между размером зерна и временем химической реакции. Последнее можно рассматривать как подтверждение схемы послойного горения зерна.

3. При малых содержаниях наполнителя (пористость более 20%) у зарядов из заводских зерен гексогена и тротила $D_{кр}$ постоянно. Дальнейшее увеличение степени заполнения свободного пространства заряда (до полного) инертным веществом сопровождается возрастанием $D_{кр}$ (у заводского гексогена с 5300 до 7300 м/сек, у тротила с 4500 до 6300 м/сек), что, по-видимому, связано с реакцией в неоднородностях (микропоры, дислокации), которые в них имеются.

4. Полученные экспериментальные данные плохо согласуются с выводами работ [2, 5, 6], выдвигающих дробление зерен в качестве причины, объясняющей несоответствие между временем реакции в детонационной волне и размерами зерна ВВ.

Поступила в редакцию
2/XII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Харитон. Сб. «Вопросы теории ВВ». Вып. I. Изд. АН СССР, 1947.
2. А. Н. Дремни, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
4. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1939; 24, 992; 1945, 50, 285.
5. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1967, 3, 4.
6. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3.
7. W. E. Gordon. 4-th Symposium (International) Detonation, Washington, 1967.
8. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, 1967.
9. И. М. Воскобойников, В. М. Богомоллов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 3.
10. А. Я. Апин, Г. В. Димза. Докл. АН СССР, 1970, 192, 4.