

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Харитон. Проблемы химической кинетики горения и взрывов. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1947.
2. С. Б. Кормер. УФН, 1968, 94, 4, 639—683.
3. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 4, 807.
4. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Научно-технические проблемы горения в взрывах, 1965, 2, 93.
5. А. Н. Дремин, С. Д. Савров. ФГВ, 1966, 2, 1, 36.
6. Р. Х. Курбангалина. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1947.
7. Термические константы веществ. Вып. III. М., Изд-во АН СССР, 1968.
8. D. Price, T. P. Liddiard, R. D. Drosd, U. S. Government. Res. Develop. Rep. August, 1966.
9. Л. И. Хмельницкий. Справочник по взрывчатым веществам. Ч. 2. М., 1962, 800.
10. Р. Х. Курбангалина. ЖФХ, 1948, 22, 49.
11. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4, 105.
12. Е. И. Грибова, С. А. Каменецкая и др. ЖФХ, 1960, 34, 7, 1395.
13. R. O. Miller, J. Phys. Chem., 1962., 36, 193.
14. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. ЖФХ, 1960, 34, 3, 603.

УДК 662.215.5

СЖИМАЕМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВВ В ПОРИСТОМ СОСТОЯНИИ

А. Н. Дремин, К. К. Шведов, О. С. Авдонин
(Москва)

Экспериментальные исследования ударной сжимаемости пористых ВВ существенно осложняются высокой чувствительностью ВВ. Порошкообразные ВВ даже при давлениях в несколько килобар быстро разлагаются, вследствие чего возникают трудности принципиального характера. В процессе сжатия такого ВВ во фронте ударной волны может происходить частичное химическое разложение или фазовое превращение, и получаемое после сжатия состояние будет относиться к смеси исходного вещества и продуктов превращения. Все это предъявляет повышенные требования к экспериментальной технике и трактовке получаемых результатов.

Попытки получить экспериментально ударную адиабату пористого ВВ предприняты в работе [1]. Ударная сжимаемость порошкообразного тротила исследовалась в работе [2]. Детальному рассмотрению этого вопроса посвящена работа [3], где получены ударные адиабаты пороха НВ в сплошном и пористом состоянии. В работе [3] в целях избежания возможных ошибок и достижения большей точности было предложено определять ударную сжимаемость ВВ путем одновременного измерения массовой скорости во фронте ударной волны на границе раздела инертная преграда — исследуемое ВВ (u_ϕ) и скорости фронта (D) на конечной базе измерения электромагнитным методом в условиях действия ударной волны прямоугольного профиля. Использование ударной волны прямоугольного профиля позволяет обнаруживать химическую реакцию разложения ВВ и учитывать ее возможное влияние на получаемые ре-

зультаты и их трактовку. Кроме того, значения D рассчитываются методом отражения по известным параметрам ударной волны в инертной преграде и массовой скорости на границе раздела. Совпадение рассчитанных и экспериментальных значений D означает, что определяется ударная адиабата исходного вещества.

В настоящей работе этим же методом получены ударные адиабаты пористых образцов гексогена с начальной плотностью $\rho_{00}=1,0 \text{ г/см}^3$, тетрила $\rho_{00}=0,86 \text{ г/см}^3$, флегматизированного тэна $\rho_{00}=0,82 \text{ г/см}^3$ и аммиачной селитры $\rho_{00}=0,86 \text{ г/см}^3$. Средний размер частиц исследованных ВВ составлял 0,2—0,5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В табл. 1 приведены экспериментальные значения массовой скорости (u , км/сек) и скорости фронта ударной волны (D , км/сек) в исследуемых веществах. В таблице даны средние значения указанных величин из 3—5 опытов. Отклонение от среднего не превышало 5—6%. Различие между измеренными и расчетными D несколько больше и составляет 10%.

В пределах указанной точности все экспериментальные точки для каждого вещества можно описать аналитически в $(D-u)$ -координатах линейными зависимостями, которые представлены в табл. 2. В этой же таблице приведены ударные адиабаты исследованных веществ в сплошном состоянии. Для тетрила, тэна и аммиачной селитры они получены расчетом по формуле $D=c_0+2u-0,1u^2/c_0$, предложенной

в работе [4]. Значения скорости звука c_0 для тетрила и тэна взяты также из этой работы, а в аммиачной селитре c_0 было измерено с помощью ультразвукового дефектоскопа. (Численные значения c_0 совпадают со значениями первых коэффициентов в формулах ударных адиабат табл. 2.) Ударная адиабата монокристаллического гексогена заимствована из работы [5].

Приведенные ударные адиабаты пористых ВВ справедливы в диапазоне давлений $\sim 10-100$ тыс. атм. Экстраполяция полученных зависимостей в сторону больших и меньших давлений должна производиться с большой осторожностью. Дело в том, что в отмеченном диапазоне давлений время разложения исследуемых образцов ВВ существенно больше времени завала переднего фронта осциллограмм записи $u(t)$, определяемого параметрами измерительной схемы и временем упаковки вещества во фронте ударной волны. Это обстоятельство и делает возможным определение параметров состояния ударно сжатого, но непрореагировавшего

Таблица 1

Гексоген		Тетрил		Тэн		Селитра	
u	D	u	D	u	D	u	D
0,44	1,40	0,76	1.52*	0,76	1.70	0,81	1.97
			1,58		1,90		2,06
1,07	2,44	0,96	1,87	0,90	2,20	1,52	2,94
			1,93		2,03		3,12
1,24	2,60	1,56	2,98	1,74	3,54	1,76	3,53
			3,12		3,46		3,38
1,50	3,00	2,14	4,05	2,20	4,0	2,02	3,75
			4,15		4,25		3,66
1,90	4,30	2,80	5,25	3,50	6,5	2,32	4,20
			5,1		6,54		4,07
2,60	6,00	—	—	—	—	—	—

* Числитель — непосредственные измерения на базе 3 мм, знаменатель — расчет по методу отражения.

вещества путем экстраполяции записи $u(t)$ в зоне реакции к $t=0$ [3]. Можно представить, что при некоторых достаточно высоких давлениях время разложения пористого вещества будет близким ко времени его упоковки и тогда невозможно будет отделить ударно сжатое вещество

Таблица 2

ВВ	Плотность, г/см ³	Формула
Гексоген	1,0	$D=0,4+2,00 u$
	1,80	$D=2,87+1,61 u$
Тетрил	0,86	$D=0,35+1,75 u$
	1,73	$D=2,17+1,91 u$
Тэн	0,82	$D=0,47+1,73 u$
	1,77	$D=2,42+1,91 u$
Аммиачная селитра	0,86	$D=0,84+1,42 u$
	1,73	$D=2,20+1,96 u$

от продуктов и получить ударную адиабату исходного вещества при этом давлении.

С точки зрения разложения вещества экстраполяция полученных ударных адиабат в область малых давлений не встречает препятствий. Однако в области малых давлений (в зависимости от пористости) возможно расщепление ударных волн. В наших экспериментах во всем исследованном диапазоне давлений этого не наблюдалось. Для дальнейшего анализа результатов будем считать, что полученные ударные адиабаты дают действительные состояния или возможные (т. е. такие

состояния, которые в действительности не реализуются, но они были бы, если бы не было реакции) состояния ударно сжатого вещества в любом диапазоне давлений. Это не будет влиять на основные качественные выводы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя найденные аналитические выражения ударных адиабат, нетрудно рассчитать кривые ударной сжимаемости в $(p-v)$ -координатах. Для всех исследованных веществ в $(p-v)$ -координатах ударные адиабаты пористых образцов располагаются выше ударных адиабат сплошных образцов, как это и должно быть в соответствии с общепринятыми представлениями [6, 7] для веществ с нормальными термодинамическими свойствами.

Полученные данные дают возможность найти параметры уравнения состояния. Для описания состояния ВВ в практически интересной области давлений и температур ($p \leq 500$ кбар) воспользуемся двучленным уравнением состояния вида $p = p_0 + p_T$ и $E = E_x + E_T$ [7], где p_x и E_x — упругие, p_T и E_T — тепловые, составляющие давления и энергии соответственно.

Определение p_x и E_x возможно, если известен коэффициент Грюнрайзена

$$\gamma = v \frac{p_T}{E_T},$$

который может быть найден из экспериментальных данных по ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов. Согласно [7],

$$\gamma = v \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta E_1 - \Delta E_2},$$

где индексом «1» отмечены приращения соответствующих величин на

ударной адиабате пористого образца, а индексом «2» — сплошного при некотором v . В табл. 3 приведены значения удельных объемов, приращений давлений и внутренней энергии пористых и сплошных образцов исследованных ВВ и значения коэффициента Грюнайзена. Из табл. 3 видно, что значения γ могут существенно отличаться для разных ВВ и уменьшаются с ростом давления. При больших давлениях γ меняются незначительно. Поэтому при определении упругих составляющих давления и энергии и в расчете температуры ударного разогрева будем считать γ постоянным и равным его значениям при больших давлениях. Методика расчета p_x и E_x с постоянным γ и синтеза на основе этого ударных адиабат различной пористости была разработана в работе [6].

Таблица 3

ВВ	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$\Delta p_1, \text{ кбар}$	$\Delta p_2, \text{ кбар}$	$\Delta E_1 \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$\Delta E_2 \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	γ
Гексоген	0,551	100,0	1,0	21,0	0,0	2,6
	0,544	150,0	3,0	30,0	0,0	2,66
	0,539	200,0	5,0	40,0	1,0	2,63
Тетрил	0,600	20,0	0,0	5,6	0,0	2,12
	0,572	50,0	1,85	14,7	0,0	1,87
	0,542	100,0	5,65	30,8	0,1	1,66
	0,537	150,0	6,85	46,75	0,14	1,65
	0,530	200,0	9,4	63,0	0,23	1,61
Тэн	0,605	18,0	0,0	5,0	0,0	2,4
	0,607	50,0	0,0	15,3	0,0	1,98
	0,567	150,0	0,0	49,1	0,0	1,72
	0,560	200,0	2,5	66,0	0,06	1,67
Аммиачная селитра	0,542	50,0	5,0	15,45	0,09	1,59
	0,497	100,0	25,0	33,20	1,02	1,15
	0,470	150,0	46,2	51,90	2,52	0,93
	0,455	176,0	62,5	62,0	3,88	0,88

Результаты расчетов p_x , E_x , p , E и T образцов различной пористости на основе выводов этой работы представлены в табл. 4—8, где даны значения соответствующих величин на ударных адиабатах различной пористости ($m = v_{00}/v$) при одинаковых давлениях.

При расчетах величин табл. 4 в соответствии с данными табл. 3 использовались следующие значения коэффициентов Грюнайзена: гексоген — 2,6, тетрил — 1,65, тэн — 1,7, аммиачная селитра — 0,9.

С целью выяснения возможного влияния погрешностей в определении γ были проведены расчеты кривой холодного сжатия тэна с $\gamma = 1,5$ и 2,0. Они дали результаты, практически совпадающие с расчетами для $\gamma = 1,7$. Следовательно, заметная ошибка в γ ($\approx 30\%$) мало сказывается на рассчитанных параметрах ударного сжатия в рассматриваемом диапазоне давлений.

Ударные адиабаты максимальной пористости для каждого ВВ в табл. 4 являются экспериментальными.

Расчет температур производился с учетом зависимости теплоемкости от температуры. При комнатной температуре значения теплоемкостей брались исходя из имеющихся в литературе экспериментальных данных (гексоген — 0,3 кал/г·град [8], тэн — 0,27, тетрил — 0,22 [9], аммиачная селитра — 0,4 кал/г·град [10]). В области температур 600—800° К

Таблица 4

P, кбар	Кривая холодного сжатия		m = 1,0; $\rho_{00} = 1,8 \text{ г/см}^3$		m = 1,2; $\rho_{00} = 1,5 \text{ г/см}^3$		m = 1,4; $\rho_{00} = 1,29 \text{ г/см}^3$		m = 1,6; $\rho_{00} = 1,12 \text{ г/см}^3$		m = 1,8; $\rho_{00} = 1,0 \text{ г/см}^3$					
	v, см ³ /г	$E \cdot 10^6$, эрг/г	v, см ³ /г	T, °K	v, см ³ /г	T, °K	v, см ³ /г	T, °K	v, см ³ /г	T, °K	v, см ³ /г	T, °K				
25,0	0,491	0,8	0,491	300	0,506	2,0	390	0,523	3,0	520	0,543	4,5	570	0,588	5,5	620
50,0	0,454	2,0	0,457	340	0,483	4,5	480	0,508	6,0	580	0,535	9,2	740	0,566	11,0	830
75,0	0,426	3,8	0,434	370	0,466	7,8	570	0,498	9,6	680	0,529	14,0	890	0,556	16,0	980
100,0	0,406	5,7	0,417	380	0,454	10,8	630	0,491	13,1	750	0,526	17,5	960	0,551	21,0	1100
150,0	0,370	10,0	0,396	410	0,439	17,2	730	0,480	22,0	970	0,522	25,0	1100	0,544	30,0	1300
200,0	0,33	15,0	0,379	470	0,428	23,2	790	0,474	30,5	1100	0,519	33,0	1200	0,539	40,0	1500
250,0	0,31	20,0	0,365	630	0,42	31,0	920									
300,0	0,295	23,0	0,358	730	0,41	41,0	1240									

Гексоген

и выше c_v рассчитывались на основе приближенной теории теплоемкости твердого тела [11]. В промежуточном интервале температур (300—600—800° К) для определения теплоемкости использовалась линейная экстраполяция. Такой путь учета зависимости теплоемкости от температуры позволяет избежать заметного завышения расчетной температуры ударного сжатия из-за занижения (в 1,5—2 раза) c_v , при $T \approx 300^\circ \text{К}$, которое дает расчет по приближенной теории [11] по сравнению с экспериментом. Возможно, что и при более высоких температурах теория дает заниженные значения c_v , однако оно, по-видимому, невелико, так как зависимость $c_v(T)$ быстро насыщается. Погрешность расчета температуры ударного сжатия с учетом погрешностей определения ударных адиабат составляет порядка 20%.

Наибольший интерес для решения вопросов механизма детонационного разложения и чувствительности ВВ к ударному воздействию представляет оценка температуры ударного разогрева. Характерным для действия ударной волны на вещество является наряду с повышением давления рост температуры. Как видно из табл. 4—8, степень роста температуры на ударной адиабате ВВ данной пористости при изменении давления в одно и то же число раз выше там, где больше пористость. Пористость твердых ВВ является фактором понижения давления детонации.

Казалось бы, значительное уменьшение давления детонации (в 2—3 раза) порошкообразных зарядов

Таблица 5

p , кбар	Кривая холодного сжатия		$m=1,0; \rho_{00}=1,73 \text{ г/см}^3$			$m=1,2; \rho_{00}=1,44 \text{ г/см}^3$			$m=1,4; \rho_{00}=1,24 \text{ г/см}^3$		
	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К

Тетрил

25,0	0,485	1,0	0,485	1,2	320	0,50	2,6	450	0,512	4,0	550
50,0	0,450	2,0	0,455	3,0	400	0,472	5,6	590	0,489	8,2	750
75,0	0,425	3,5	0,433	5,3	480	0,453	8,8	680	0,475	12,5	870
100,0	0,408	5,0	0,419	7,6	530	0,439	12,5	800	0,465	17,4	1050
150,0	0,385	8,0	0,40	13,0	670	0,420	20,5	1040	0,450	26,0	1300
200,0	0,370	10,6	0,386	19,0	850	0,41	27,4	1280	0,439	40,0	1900
250,0	0,359	13,0	0,378	24,4	990						
300,0	0,35	15,0	0,37	31,0	1170						
350,0	0,34	18,0	0,365	36,0	1300						

Таблица 6

p , кбар	$m=1,6; \rho_{00}=1,08 \text{ г/см}^3$			$m=1,8; \rho_{00}=0,96 \text{ г/см}^3$			$m=2,0; \rho_{00}=0,865 \text{ г/см}^3$		
	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К	v , см ³ /г	$E \cdot 10^9$, эрг/г	T , °К

Тетрил

25	0,519	8,0	750	0,543	6,8	700	0,594	7,4	750
50	0,505	14,0	1100	0,533	12,4	950	0,519	14,6	1050
75	0,497	18,4	1200	0,527	18,0	1150	0,557	23,0	1400
100	0,490	23,6	1350	0,524	23,0	1260	0,550	30,5	1700
150	0,480	37,0	1850	0,517	38,0	1900	0,540	45,0	2250
200	0,473	50,0	2350	0,513	44,4	2100	0,534	56,0	2600

по сравнению с монолитными должно приводить и к сильному падению температуры ударного разогрева ВВ. Это, естественно, вызывало сомнения относительно применимости модели Зельдовича, отводящей решающую роль в механизме детонационного разложения ВВ адиабатическому разогреву, к детонации порошкообразных ВВ и стимулировало развитие других представлений на механизм распространения детонации и превращения вещества. Наибольшее распространение при этом получили представления о взрывном горении [12, 13]. Однако, как следует из приведенных выше расчетов, снижение давления детонации

<i>p</i> , кбар	Кривая холодного сжатия		<i>m</i> =1,0; ρ_{00} =1,77 г/см ³			<i>m</i> =1,2; ρ_{00} =1,475 г/см ³			<i>m</i> =1,4; ρ_{00} =1,265 г/см ³		
	<i>v</i> , см ³ /г	<i>E</i> ·10 ⁹ , эрг/г	<i>v</i> , см ³ /г	<i>E</i> ·10 ⁹ , эрг/г	<i>T</i> , °К	<i>v</i> , см ³ /г	<i>E</i> ·10 ⁹ , эрг/г	<i>T</i> , °К	<i>v</i> , см ³ /г	<i>E</i> ·10 ⁹ , эрг/г	<i>T</i> , °К
25	0,49	0,8	0,49	0,8	300	0,502	2,0	430	0,512	3,5	510
50	0,455	1,8	0,458	2,2	330	0,472	5,1	530	0,487	7,4	670
75	0,43	3,2	0,456	4,6	410	0,453	8,5	650	0,47	12,1	820
100	0,413	4,8	0,421	7,0	470	0,439	12,0	740	0,458	17,2	980
150	0,390	8,0	0,401	12,5	600	0,421	18,4	890	0,443	26,5	1250
200	0,375	10,6	0,388	17,4	730	0,408	25,2	1100	0,432	36,0	1300
250	0,364	12,9	0,377	23,8	900	—	—	—	—	—	—
300	0,355	15,0	0,37	29,0	1050	—	—	—	—	—	—
350	0,345	18,0	0,365	33,0	1100	—	—	—	—	—	—

Тэн

путем увеличения пористости ведет к росту температуры ударного разогрева (или увеличению *T* при одинаковом *p*). Так, например, если при *p*=100 кбар температура на ударных адиабатах монолитных образцов 400—500° К, то при *m*=1,8 (ρ_{00} =1,0 г/см³) температура ударного разогрева составляет 1100—1400° К (см. табл. 4—8).

Плотности давления на ударном фронте детонационных волн в зависимости от начальной меняются в широких пределах. Сравним температуры ударного разогрева и времена химической реакции при тех давлениях, которые реально осуществляются в нормальных режимах детонации зарядов различной пористости. В табл. 9 приведены давления на ударном фронте детонационных волн некоторых ВВ (*p*_ф) и времена химической реакции по данным работы [14], а также расчетные значения *T* при этих давлениях.

При расчете (*p*_ф) в табл. 9 принималось в соответствии с данными работы [14], что давление на ударном фронте детонационной волны в 1,5 раза больше давления в точке Чепмена—Жуге. Расчет ударных адиабат и температур ударного сжатия производился независимо от данных по детонации. Поэтому в некоторых случаях начальная плотность и давления, для которых рассчитаны *T*, не совпадают полностью с детонационными для этих случаев (в табл. 9 в скобках приведены значения давлений и плотностей, которым соответствует приведенная температура).

Из приведенных в табл. 9 данных видно, что давлениям детонации зарядов различной плотности соответствуют приблизительно одинаковые температуры ударного разогрева. Если предполагать, что время реакции определяется средней температурой ударного разогрева, то этим можно объяснить и близкие значения времени реакции.

Для более детальных оценок нужно знать кинетику разложения ВВ в рассматриваемых условиях. Наиболее доступными для количественных оценок в настоящее время являются представления о нормальном адиабатическом тепловом взрыве. Расчеты с использованием кинетических констант, определенных в обычных условиях, дают для τ =0,2—0,4 мксек температуру 1100—1200° К, практически совпадающую с расчетной по ударным адиабатам. Таким образом, приведенные данные вместе с экспериментально установленным фактом наличия химика в большинстве случаев детонации конденсированных ВВ показывают решающую роль в детонационном разложении ударного разогрева само-

Таблица 7

$m=1,6; \rho_{00}=1,1 \text{ г/см}^3$			$m=1,8; \rho_{00}=0,98 \text{ г/см}^3$			$m=2,0; \rho_{00}=0,89 \text{ г/см}^3$			$m=2,16; \rho_{00}=0,82 \text{ г/см}^3$		
$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$
0,525	4,4	560	0,538	5,5	620	0,551	7,2	700	0,641	7,4	700
0,505	9,5	770	0,523	12,5	900	0,543	18,0	1170	0,608	15,8	1050
0,492	15,0	950	0,518	16,0	1000	0,540	26,0	1400	0,593	23,6	1340
0,482	21,0	1150	0,508	25,6	1300	0,538	31,0	1580	0,583	31,0	1500
0,469	31,5	1450	0,50	39,0	1750	0,533	52,0	2300	0,570	45,0	2000
0,459	45	1900	0,495	51,0	2100	0,531	60,0	2500	0,563	56,0	2400
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8

$p, \text{ кбар}$	Кривая холодного сжатия		$m=1,0; \rho_{00}=1,73 \text{ г/см}^3$			$m=1,2; \rho_{00}=1,44 \text{ г/см}^3$			$m=1,4; \rho_{00}=1,24 \text{ г/см}^3$		
	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$	$v, \text{ см}^3/\text{г}$	$E \cdot 10^9, \text{ эрг/г}$	$T, \text{ }^\circ\text{К}$

Аммиачная селитра

25,0	0,494	0,2	0,494	1,0	347	0,5	2,5	430	0,506	4,0	510
50,0	0,455	1,5	0,456	3,0	380	0,465	5,8	550	0,473	8,6	680
75,0	0,432	2,8	0,435	5,4	450	0,442	10,0	680	0,452	13,4	850
100,0	0,417	4,2	0,420	8,0	510	0,427	14,2	800	0,437	18,4	980
150,0	0,40	6,2	0,404	12,6	650	0,41	22,0	1050	0,42	28,2	1300
200,0	0,387	8,4	0,394	17,0	750	0,40	28	1200	0,408	40,0	1650
25,0	—	—	0,514	5,2	570	0,52	6,4	630	0,527	7,6	690
50,0	—	—	0,485	11,0	780	0,492	13,6	900	0,502	17,0	1040
75,0	—	—	0,464	17,2	990	0,472	21,6	1150	0,487	25,0	1300
100,0	—	—	0,448	23,8	1180	0,458	29,4	1400	0,475	33,8	1550
150,0	—	—	0,429	37,4	1640	0,44	45,0	1900	0,458	52,0	2200
200,0	—	—	0,418	52,0	2000	0,429	60,0	2400	0,444	78,0	3000

го ВВ, хотя в деталях процесс детонационного разложения твердых ВВ, по-видимому, является гораздо сложнее. Не исключено, что даже в тех случаях, когда средняя температура гомогенного разогрева достаточно высока, она не является равномерной. В этом случае разложение ВВ может протекать в форме очаговых тепловых взрывов [15].

Таблица 9

ВВ	ρ_{00} , г/см ³	$p_{Ф}$, кбар	τ , мксек	T, °К
Гексоген	1,46	~350	~0,2	1300 ($p=300$)
	1,29	~250	0,24	1250
	1,10	180	0,33	1200 ($p=200$)
	0,95	150	0,4	1300
Тетрил	1,68	≤350	≤0,1	1300 ($\rho_0=1,73$)
	1,36	200	0,2	1280 ($\rho_0=1,44$)
	0,9—0,95	100	0,4	1250
Тэн	1,66	~375	≤0,1	1100 ($\rho_0=1,7, p=350$)
	1,51	~280	~0,16	1300 ($p=250$)
	0,95	100	0,33	1300

Повышением разогрева с ростом пористости можно объяснить качественно и высокую чувствительность к ударной волне пористых ВВ по сравнению со сплошными при одинаковых давлениях. Как видно из табл. 4—8, если при давлениях 25—50 кбар ВВ в сплошном состоянии имеют температуру 300—400° К, то температура в образцах с большой пористостью ($m=1,8—2,0$) достигает 600—900° К.

Конечно, при столь низких давлениях увеличивается вероятность неравномерного разогрева. По существующим в настоящее время представлениям, температура очагов разогрева, приводящая к взрыву, составляет приблизительно 800° К [9]. Такие температуры вполне достижимы в пористых образцах при $p=25—50$ кбар. Однако и эти давления не являются минимальными, и при значительно меньших давлениях в пористых ВВ локальные разогревы могут быть значительными в результате неупругой деформации. В этом случае существенно усложняется количественная оценка температуры и размера очагов реакции. Кроме того, как показано в работе [16], при малых амплитудах ($p \approx 1,5—2$ кбар), но больших временах воздействия ударной волны помимо очагов реакции за счет неупругой деформации возникают очаги разложения и в результате разогрева газовых включений. Роль различных очагов разложения твердых ВВ может меняться в зависимости от амплитуды и длительности ударной волны.

Поступила в редакцию
13/IV 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. G. E. Seay und L. B. Seeby. J. Appl. Phys., 1961, 32, 6.
2. В. А. Васильев, Л. Г. Болховитинов, Б. Д. Христофоров. ФГВ, 1967, 3, 4.
3. В. А. Веретенников, А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ФГВ, 1969, 5, 3.
4. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомоллов, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1969, 4.
5. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1960, 131, 4.
6. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1958, 34.
7. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. М., Физматгиз, 1963.
8. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.

9. Ф. Боуден, И. Иоффе. Быстрые реакции в твердых взрывчатых веществах. Пер. с англ. Под ред. И. В. Обреимова. М., ИЛ, 1962.
10. Л. И. Хмельницкий. Справочник по взрывчатым веществам. Ч. II. М., Изд-во Арт. акад. им. Ф. Э. Дзержинского, 1961.
11. Цянь Сюэ Сень. Физическая механика. М., «Мир», 1965.
12. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1965.
13. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
14. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
15. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1967, 3, 4.
16. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3.

УДК 532.593

РАСЩЕПЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТОМ КВг

Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин, Г. И. Канель

(Москва)

В практике исследований зачастую появляется необходимость изучения ударного сжатия пористых образцов из материалов, претерпевающих фазовое превращение. Такая необходимость возникает, например, при изучении фазовых диаграмм методом ударных волн [1] и при рассмотрении газодинамической картины в случае ударного сжатия образцов в ампулах сохранения. Как известно, в области фазового превращения с уменьшением удельного объема v может происходить расщепление ударной волны на две [2]. При проведении экспериментов с пористыми образцами необходимо знать, каково влияние пористости на образование двухволновой структуры и ее характеристики.

В данной работе электромагнитным методом [3] фиксировались профили и скорости ударных волн в области существования двухволновой конфигурации в образцах бромистого калия с начальными плотностями ρ_{00} , равными 2,70; 2,57; 2,45 и 2,00 г/см³ (плотность монокристалла $\rho_0 = 2,75$ г/см³). Сборка (рис. 1) помещалась в постоянное магнитное поле напряженностью 340 э. Величина и профили массовой скорости u измерялись по величине э. д. с., наводимой в перекладине датчика, движущейся в магнитном поле вместе с исследуемым веществом после прохождения фронта ударной волны. Относительная погрешность метода составляет $\pm 5\%$ по давлению [3]. Давление (p)

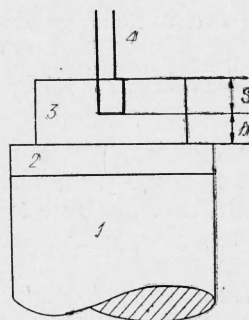


Рис. 1. Схема сборки.

1 — заряд ВВ; 2 — парафиновый экран; 3 — образец; 4 — датчик из фольги — база измерения.

в парафиновом экране регулировалось от 30 до 40 кбар изменением плотности заряда ВВ из прессованной смеси ТНТ — тальк 50/50. Глубина установки датчика h менялась от 0 до 25 мм. Размер частиц для пористых образцов брался от 0,1 до 0,3 мм. Было проведено несколько опытов с более крупными частицами: 0,3—1 мм и 1—3 мм.