

Рис. 3. Схема нагружения кристаллита (а) и траектории движения атомов из области 2 (б).
1 — область инициирования ударной волны; 2 — область исследования траекторий движения атомов.

ласти II наблюдается лишь незначительное размытие δ -пиков, то в I функция радиального распределения практически непрерывна.

Из сопоставления полученного распределения кинетической энергии в кристаллите и изменения атомной структуры материала при распространении УВ следует, что область «неустойчивости» на рис. 1 соответствует зонам структурной перестройки атомной подсистемы. Аналогичное заключение можно сделать из результатов, полученных в [1], с той разницей, что сильные смещения атомов обусловлены не формой фронта УВ, а его взаимодействием с флуктуациями тепловых колебаний атомов. Наряду с этим нарушение плоской формы фронта УВ, как видно из рис. 3, может привести к микрофрагментации в соответствующих областях кристаллита.

Изучение особенностей структурной перестройки показало, что при распространении неплоского фронта УВ функция радиального распределения атомов теряет дискретный, характерный для кристалла вид и становится непрерывной. Следует ожидать, что при достаточно быстром снятии нагрузки такая структура может быть «заморожена», что будет проявляться на электронограмме в виде характерных диффузных колец.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsai D. H., McDonald R. A. High Temp. High Press., 1976, 8, 4, 403.
2. Paskin A., Gohar A., Dienes G. J. J. Phys. Chem. Solids, 1978, 39, 12, 1307.
3. Клименко В. Ю., Дремин А. Н. Докл. АН СССР, 1980, 251, 6, 1379.
4. Powel J. D., Bettel J. H. J. Appl. Phys., 1980, 51, 4, 2050.
5. Могилевский М. А., Мышкин И. О. ФГВ, 1985, 21, 3, 113.
6. Karo A. M.— In: Shock waves in condensed matter.— N. Y., 1982.
7. Псахье С. Г., Коростелев С. Ю., Панин В. Е. 9-я Международная конференция по высокоэнергетическому воздействию на вещества.— Новосибирск, 1986.
8. Johnson V. A. Phys. Rev., 1964, A134, 1329.
9. Дынин Е. А. ФГВ, 1983, 19, 1, 111.
10. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности.— М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 26/III 1987,
после доработки — 15/VI 1987

ИЗЛУЧЕНИЕ УДАРНО-СЖАТЫХ ГАЛОГЕНПРОИЗВОДНЫХ МЕТАНА

М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников

(Москва)

В настоящее время широкие исследования свойств конденсированных веществ при высоких давлениях p и температурах T не могут ограничиваться только измерениями кинематических параметров ударной волны (УВ), т. е. ее скорости D и массовой скорости u , на основе кото-

рых определяются p , удельный объем и изменение внутренней энергии. Дополнительную информацию о состоянии вещества дают прямые измерения профилей давления (с помощью различных датчиков), прозрачности вещества, электропроводности и температуры ударного сжатия. Знание температур позволяет проверить и углубить имеющиеся представления об уравнении состояния и свойствах веществ при высоких давлениях. Особенно это относится к средам, которые способны под воздействием УВ претерпевать различного рода превращения. Обычно о наличии превращения судят по аномальному характеру изменения какого-нибудь параметра состояния от интенсивности волны (например, D от u), и на основании анализа имеющихся данных выдвигаются различные гипотезы о самом характере превращения. Экспериментальное определение T для таких веществ может наложить ограничение на выбор того или иного механизма превращения и продуктов, которые получаются при этом.

В настоящей работе исследовалось термическое излучение галогенпроизводных метана: хлороформа CHCl_3 , бромформа CHBr_3 , дихлорметана CH_2Cl_2 , дибромметана CH_2Br_2 и диодметана CH_2I_2 при ударных нагрузках. Среди галогенпроизводных метана к настоящему времени наиболее полно изучены свойства четыреххлористого углерода, для которого имеются опыты по определению прозрачности [1], электропроводности [2—4], динамической сжимаемости [1, 2, 5—7] и измерены температуры ударного сжатия [8, 9]. Причем, CCl_4 был первой органической жидкостью, для которой экспериментально определена зависимость $T(p)$ и обнаружена особенность, характеризующаяся относительно слабым ростом T в области $p = 20 \div 27$ ГПа. Эта аномалия связывалась с фазовым переходом [8] или с термическим разложением CCl_4 [8, 10]. Для остальных галогенпроизводных метана систематических измерений температур ударного сжатия не проводилось, однако имеются экспериментальные данные по динамической сжимаемости [11, 12].

Проведение работы также стимулировалось методологическими возможностями применения галогенпроизводных метана в качестве индикаторных материалов при исследовании ударных и детонационных волн. Последнее направление получает все более широкое распространение из-за сильной зависимости яркости теплового излучения от T , которая в первом приближении пропорциональна интенсивности волны. В данном случае жидкость выступает в роли датчика давления (индикатора), имеющего высокие амплитудную и временную характеристики.

Методические возможности можно проиллюстрировать следующим примером: увеличение p в бромформе от 20 до 21 ГПа (5 %) приводит к изменению регистрируемого сигнала, пропорционального яркости излучения, более чем на 40 %. Таким образом, помещая индикаторную среду на исследуемое вещество, по измерению яркости излучения ударного фронта в ней можно получать информацию о состоянии в самом веществе. Временное разрешение в этом случае будет определяться параметрами использованной аппаратуры и коэффициентом поглощения ударно-сжатого материала индикатора. Но в то же время регистрируемые изменения на фронте УВ в жидкости происходят значительно медленнее, чем на контактной границе исследуемое вещество — индикаторная среда. Кроме указанных преимуществ такой метод изучения ударных и детонационных волн дает непрерывную информацию о изменении интенсивности волны во времени, а широкий диапазон начальных плотностей и сжимаемостей позволяет выбрать индикатор с близкой к изучаемой среде акустической жесткостью. Примерами использования указанной методики исследования поведения веществ при высоких p и T могут служить, например, работы по определению скоростей звука в ударно-сжатых металлах [13] и зоны химической реакции в конденсированных ВВ [14].

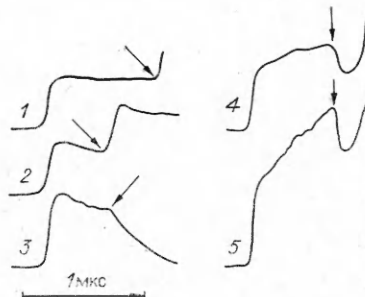
Методика эксперимента

Температура за фронтом УВ, распространяющейся по исследуемому веществу, определялась оптическим методом, основанном на сравнении потоков, излучаемых веществом и эталонным источником света. Эксперименты проводились на установке, подобной описанным в работах [8, 9, 14]. В качестве приемников излучения использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-119 и ФЭУ-92, изменение фототока которых фиксировалось осциллографом ОК-33М. Яркость излучения регистрировалась на двух эффективных длинах волн $\lambda = 420$ и 720 нм (в синей и красной областях спектра). Для выделения спектральных областей использовался двухполосный светофильтр СС-2, который в комбинации с ФЭУ давал приведенные длины волн. Интенсивность светового потока, падающего на ФЭУ, при необходимости регулировалась нейтральными светофильтрами из стекла НС-8 с известной спектральной чувствительностью. Градуировка установки проводилась по температуре продуктов нормальной детонации нитрометана и принималась равной 3700 К. Точность определения T ударного сжатия составляла $100-200$ К в зависимости от абсолютного значения температуры, причем величины на разных длинах волн совпадали в пределах этой погрешности.

Ударные волны в исследуемых жидкостях создавались традиционными способами — ударом разогнанной продуктом детонации дюралюминиевой пластины по дну металлической кюветы из алюминиевого сплава, меди и магния, где находилась жидкость, либо отражением падающей ДВ от дна кюветы. В опытах использовались заряды из различных ВВ диаметром 40 и высотой 60 мм; детонация инициировалась генератором плоского фронта. Как правило, слой жидкости не превышал 5 мм. Излучение фиксировалось из центральной области кюветы через диафрагму диаметром 5 мм и далее через оптическую линию выводилось к ФЭУ.

На рис. 1 приведены типичные записи яркости излучения во времени при различных схемах нагружения. УВ создавались: 1 — детонацией заряда ТГ 50/50, $\rho_0 = 1,65$ г/см³; 2, 4, 5 — октогена, $\rho_0 = 1,80$ г/см³ и 3 — ударом летящей со скоростью $4,58$ км/с пластины. Время нарастания переднего фронта в основном определяется частотными характеристиками усилителей осциллографа, а в случае метания — плоскостностью полета пластины, и составляет около 50 нс. Для хлороформа, дихлорметана, бромформа и дибромметана записи яркости излучения от времени при одинаковом способе нагружения качественно совпадают. Это связано с достаточно близкими и незначительными коэффициентами поглощения указанных жидкостей. В опытах с диодметаном наблюдается сильное влияние поглощения несжатого слоя жидкости (см. рис. 1), причем оно зависит от λ . Поэтому при обработке пленок измерения на осциллограммах проводились непосредственно перед выходом УВ из жидкости в воздух. Начальный момент выхода УВ для диодметана характеризуется сначала уменьшением яркости излучения и только после этого происходит достаточно резкое ее увеличение. Такой характер записи отмечается и при некоторых интенсивностях УВ в бромформе, т. е. в плотных

Рис. 1. Типичные записи яркости излучения хлороформа (1—3) и диодметана при $\lambda = 720$ (4) и 420 нм (5). Кюветы из алюминиевого сплава с толщиной дна $1,93$ (1), $1,09$ (2), $1,98$ (3) и $2,85$ мм (4, 5). Стрелками показаны моменты выхода ударной волны из жидкости в воздух (1, 4, 5), моменты догона второй УВ первой (2) и волной разрежения фронта УВ (3).



Т а б л и ц а 1

Вещество	ρ_0 , г/см ³	a , км/с	b	d , с/км	Диапазон u , км/с	Ссылка
СНCl ₂	1,483	1,317	1,572	0	0,8—2,9	[11]
	1,483	3,456	0,833	0	2,9—3,3	
	1,483	1,031	1,539	0	3,3—4,8	
СНBr ₃	2,89	0,928	2,0	0,108	0—2,0	[15]
	2,89	0,937	1,723	0	0—2,0	[12]
СН ₂ Cl ₂	1,326	1,29	1,836	0,081	0,3—4,7	[11]
СН ₂ Br ₂	2,49	0,998	1,79	0,09	0,7—4,1	[11]
СН ₂ I ₂	3,325	1,28	1,383	0	0,4—3,3	[11]
Сплав						
Al 2024	2,786	5,328	1,338	0	0—3,8	[16]
Cu	8,9	3,958	1,497	0	0,5—2,2	[16]
Mg	1,72	4,78	1,16	0	0,7—2,9	[16]

жидкостях и, по всей видимости, связан с особенностями формирования УВ в воздухе. В остальных случаях после выхода УВ из жидкости резко повышалась интенсивность излучения.

Состояние в жидкостях находилось на основании известных ударных адиабат веществ, скоростей метания пластин и параметров детонации взрывчатых материалов. Ударные адиабаты исследуемых сред и используемых металлов в виде $D - a + bu - du^2$ приведены в табл. 1. Для бромформы даны два выражения — первое получено на основании обобщенной зависимости [15] в предположении отсутствия превращения за фронтом УВ, второе — из обработки под линейную зависимость незначительного массива экспериментальных данных, приведенных в [12] до $p \sim 24$ ГПа. При $p = 10 \div 45$ ГПа относительная разница в интенсивностях УВ, рассчитанных по этим выражениям, изменяется от 5,5 до 1%. Состояния в бромформе находились по экспериментальной зависимости, но ее экстраполяция в область $p > 24$ ГПа может дополнительно приводить к ошибкам, связанным с возможностью протекания превращения с изменением удельного объема. Точность определения состояния в других жидкостях составляла $\sim 5\%$ по давлению.

Экспериментальные результаты

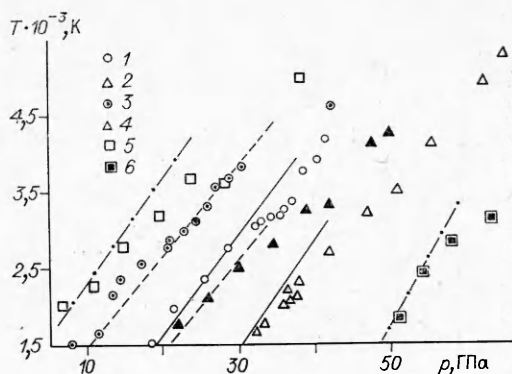
Полученные в работе значения T ударного сжатия галогенпроизводных метана представлены в табл. 2 и на рис. 2. В таблице кроме T приводятся состояния в среде (массовые скорости), непосредственно контактирующей с жидкостью, p в жидкостях и λ , на которых проводились измерения. Чтобы показать разброс при регистрации на разных λ , значения T даны с точностью 10 К, хотя точность измерения ниже. В пределах реальных погрешностей эксперимента T совпадают в красной и синей областях спектра, поэтому на иллюстративных графиках приведены осредненные по длинам волн величины.

Хлороформ. До $p \sim 19$ ГПа и $T \sim 2800$ К наблюдается линейный ход зависимости. Формально эту область можно описать выражением $T = (497 \pm 29) + (121 \pm 2)p$. Выше $p = 19$ ГПа рост температуры замедляется с увеличением интенсивности УВ, что указывает на протекание превращения, идущего с поглощением энергии. Область слабого изменения температуры лежит до $p \sim 27$ ГПа и $T \sim 3300$ К.

Бромформ. В исследуемом диапазоне давлений изменение температуры достаточно монотонно. Весь массив экспериментальных данных можно описать линейной зависимостью $T = (276 \pm 50) + (108 \pm 2)p$ со среднеквадратичным отклонением 93 К или разбить на два участка (до 30 ГПа и выше). Тогда нижний участок имеет вид $T = (264 \pm 103) + (109 \pm 5)p$, а верхний $T = (3400 \pm 260) + (120 \pm 7)(p - 30)$, соответственно отклонения 87 и 106 К.

Рис. 2. Зависимости температур ударного сжатия от интенсивности ударной волны.

1 — CHCl_3 ($p + 10$ ГПа); 2 — CHBr_3 ($p + 20$ ГПа); 3 — CH_2Cl_2 ; 4 — CH_2Br_2 ($p + 10$ ГПа); 5 — CH_2I_2 ($p + 8$ ГПа); 6 — CCl_3Br ($p + 40$ ГПа) [17]; линии — расчет по [18].



Дихлорметан. Температурная зависимость дихлорметана близка к CCl_4 и CHCl_3 , но область слабого изменения на ней выражена не так четко. По аналогии можно выделить область линейного изменения температуры до 18 ГПа, где $T = (446 \pm 239) + (124 \pm 17)p$. Выше наклон уменьшается, но точно указать верхнюю границу, исходя из полученных значений, трудно.

Дибромметан. Для дибромметана картина качественно подобна хлороформу. Нижний участок при $p = 12 \div 29$ ГПа можно описать выражением $T = (703 \pm 78) + (88 \pm 3)p$. Выше (до $p = 32$ ГПа) T изменяется незначительно.

Диодметан. Уменьшение роста температуры с давлением происходит около 32 ГПа. Ниже этого давления экспериментальные данные описываются выражением $T = (480 \pm 116) + (99 \pm 5)p$. Верхнюю границу можно оценить в 40 ГПа.

Формальное описание линейной зависимостью определенных участков экспериментальных зависимостей не имеет физических обоснований, но удобно при использовании указанных жидкостей в качестве индикаторов давления.

Обсуждение результатов

Полученные зависимости температур ударного сжатия галогенпроизводных метана от давления имеют области, характеризующиеся более слабым ростом температуры. Этот факт указывает на протекание в них превращений, сопровождающихся поглощением энергии. Аналогичные особенности отмечены при ударном нагружении CCl_4 [8, 9] и CCl_3Br [17], $T - p$ -зависимость которого приведена на рис. 2. Для CCl_4 , CHCl_3 , CH_2Br_2 и CH_2I_2 можно ограничить эту область по давлению сверху. Необходимо отметить, что идентификация границы или области аномального поведения какого-нибудь параметра, характеризующего процесс, связана с соотношением точности измерения этого параметра и величины его изменения, а также с массивом экспериментальных данных в этой области, что, естественно, может вносить известный субъективизм в трактовку исходных данных. Это в равной степени относится как к определению границ из $T - p$ -, так и $D - u$ -зависимостей. Кроме того, сам факт превращения может в разной степени отражаться на экспериментальных значениях температур и скоростей УВ. В связи с этим наряду с формальной обработкой данных, которая проведена выше, представляет интерес сравнение температур ударного сжатия и скоростей волн с результатами расчетов, выполненных в предположении отсутствия превращения.

Ударные адиабаты исследуемых веществ были рассчитаны по обобщенной зависимости [15], а температуры — по схеме [18]. На рис. 3, а представлены скорости ударных волн для CHCl_3 и CH_2Cl_2 . Резкое отклонение экспериментальных значений D от рассчитанных у хлороформа происходит при $u = 2,9$ км/с. Именно с этого состояния и начинается область превращения, указанная в [11]. Аналогичная картина наблюдается и для дихлорметана. Можно выделить область с массовыми скоростями от 2,9 до 3,37 км/с ($p = 23 \div 28,3$ ГПа), в которой происходит слабый рост D . Сравнение температур ударного сжатия (см. рис. 2) хлороформа показывает неплохое согласие рассчитанных и экспериментальных ве-

Таблица 2

Матери- ал экра- на	$u_{э}$, км/с	λ , нм	Хлороформ *		Бромформ		Дихлорметан		Дибромметан		Диодметан	
			p	T	p	T	p	T	p	T	p	T
Al	3,07	720	—	—	—	—	42,4	4600	—	—	—	—
		420	—	—	—	—	4600	—	—	—	—	
	2,39	720	30,4	3890	45,4	5400	28,9	3600	40,1	4300	46,3	5100
		420	—	3850	—	5100	—	3700	—	4200	—	5000
	2,29	720	28,7	3740	42,5	4900	27,1	3540	37,7	4100	43,3	4480
		420	—	3760	—	4900	—	3580	—	4070	—	4310
	2,14	720	26,1	3280	—	—	—	—	—	—	—	—
		420	—	3240	—	—	—	—	—	—	—	—
	2,05	720	24,5	3120	35,7	4100	22,9	3000	31,9	3350	36,5	3700
		420	—	3170	—	4050	—	3050	—	3280	—	3550
	1,97	720	23,0	3100	—	—	—	—	—	—	—	—
	1,92	720	22,3	3080	—	—	21,0	2860	—	—	—	—
420		—	3030	—	—	—	2830	—	—	—	—	
1,87	720	—	—	30,9	3530	—	—	28,9	3300	31,8	3740	
	420	—	—	—	3500	—	—	—	3180	—	3610	
1,70	720	18,5	2750	26,9	3270	17,3	2530	24,4	2840	27,7	3180	
	420	—	2740	—	3100	—	2570	—	2780	—	3140	
1,50	720	15,4	2330	21,9	2770	14,5	2310	19,9	2530	22,8	2830	
	420	—	2390	—	2630	—	2370	—	2450	—	2700	
1,29	720	—	—	—	—	—	—	16,1	2080	18,5	2270	
	420	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2240	
1,26	720	11,6	1930	17,0	2040	11,5	1630	—	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Mg	2,90	720	31,7	4200	—	—	30,4	3750	—	—	—	—
		420	—	4070	—	—	—	3800	—	—	—	—
	2,51	720	25,7	3060	—	—	24,4	3060	—	—	—	—
420		—	3250	—	—	—	3110	—	—	—	—	
1,62	720	—	—	—	—	13,5	2160	—	—	—	—	
Cu	1,04	720	—	—	18,0	2340	—	—	—	—	—	—
		420	—	—	—	2280	—	—	—	—	—	—
	1,03	720	—	—	17,8	2080	—	—	—	—	—	—
		420	—	—	—	2160	—	—	—	—	—	—
	0,98	720	—	—	16,7	2200	—	—	—	—	—	—
		420	—	—	—	2210	—	—	—	—	—	—
	0,97	720	—	—	16,1	1970	—	—	—	—	—	—
420		—	—	—	2010	—	—	—	—	—	—	
0,86	720	8,5	1520	—	—	8,0	1510	12,0	1750	14,5	2000	
0,85	720	—	—	13,3	1750	—	—	—	—	—	—	
0,81	720	—	—	12,3	1650	—	—	—	—	—	—	
Без эк- ра- на	**	720	—	3300	—	—	26,0	3330	—	—	—	—
	420	27,1	3360	—	—	—	3250	—	—	—	—	
***	720	—	—	—	—	20,8	2800	—	—	—	—	
	420	—	—	—	—	—	2700	—	—	—	—	

* p — в ГПа, T — в К.** Жидкость контактировала с поверхностью заряда октогена плотностью 1,80 г/см³.*** С зарядом флегматизированного гексогена плотностью 1,66 г/см³.

личин до $p = 20$ ГПа. Изменение температуры дихлорметана с давлением носит более сложный характер. До $p = 20$ ГПа экспериментальные значения лежат выше расчета (такая ситуация реализуется только у дихлорметана), в диапазоне $p = 20 \div 30$ ГПа результаты формально совпадают, а при $p > 30$ ГПа рассчитанные величины превышают экспериментальные. Если сравнить давления начала превращения, полученные

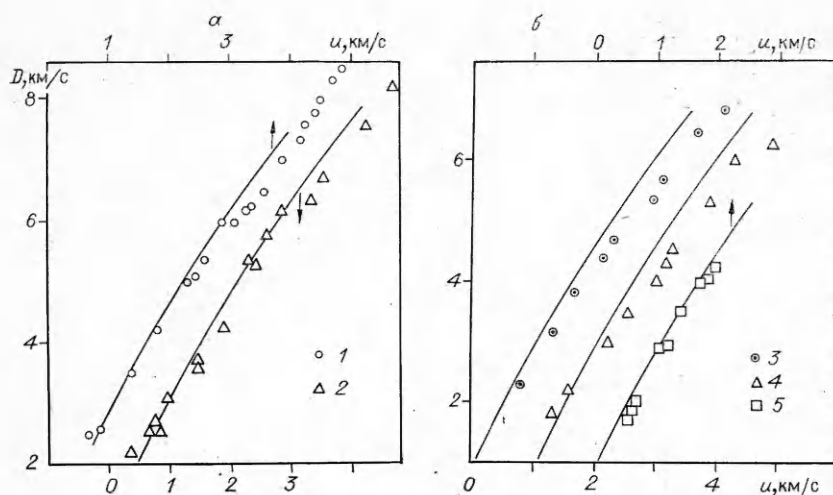


Рис. 3. $D-u$ зависимости.
 1 — хлороформ; 2 — дихлорметан; 3 — дибромметан; 4 — диодметан ($u + 1$ км/с);
 5 — бромформ [11, 12]; линии — расчет по [15].

из зависимостей $T-p$ и $D-u$, то в CHCl_3 и CH_2Cl_2 температура начинает реагировать на происходящее изменение при более низких давлениях, причем различие значительно превосходит возможные погрешности определения.

Экспериментальные значения скоростей УВ в CH_2Br_2 и CH_2I_2 начинают отклоняться от обобщенной зависимости при более низких давлениях, чем в хлорпроизводных метана (рис. 3, б), но из-за недостаточного массива данных в этой области границы начала отклонений четко не выражены. По этой же причине ничего определенного нельзя сказать о бромформе. В то же время рассчитанные температуры ударного сжатия бром- и иодпроизводных метана неплохо согласуются с экспериментальными значениями при низких давлениях (см. рис. 2), а состояния, при которых начинаются отклонения, выражены лучше, чем на $D-u$ зависимостях.

Природа превращений галогенпроизводных метана в условиях ударно-волнового нагружения в настоящее время до конца не выяснена. Например, поведение CCl_4 при $p = 20 \div 27$ ГПа часто отождествляли с плавлением, предполагая, что в диапазоне $p = 0,2 \div 20$ ГПа он находится в твердом состоянии [8]. Имеющиеся кривые плавления CCl_4 , CH_2Cl_2 , CHCl_3 и CHBr_3 [19] получены при $p < 3$ ГПа, и для сравнения с экспериментальными значениями необходимо их экстраполировать в область значительно более высоких состояний. Такая экстраполяция может приводить к заметным непрогнозируемым ошибкам. Тем не менее, подобного рода сравнения проводятся, хотя они и носят скорее традиционный характер. Для указанных веществ получено, что в исследуемом диапазоне давлений они находятся в жидком состоянии. Кроме того, начальные участки ударных адиабат на $D-u$ зависимостях хлорпроизводных метана хорошо описываются обобщенным выражением для веществ без превращения, что вряд ли было бы возможным при их затвердевании.

По-видимому, превращения галогенпроизводных метана обусловлены термическим распадом. Если первичной, наиболее вероятной причиной является отрыв атома галоида, то дальнейший ход превращения, его стадии, связь продуктов разложения с давлением не ясны. Более того, в настоящее время аномальные изменения температур ударного сжатия нельзя однозначно связать с началом и завершением полного распада или же началом и реализацией отдельной стадии разложения. Подобные вопросы возникают и при анализе поведения других органических соединений в условиях ударного нагружения. Для их решения необходимо

дальнейшее усовершенствование измерительной техники и создание термодинамически обоснованных методов математического моделирования таких процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walsh J. M., Rice M. H. J. Chem. Phys., 1957, 26, 4, 815.
2. Mitchell A. C., Keeler R. N. Rev. Sci. Instr., 1968, 36, 4, 513.
3. Hawke R. S., Mitchell A. C., Keeler R. N. Rev. Sci. Instr., 1969, 40, 638.
4. Юшко К. Б., Кришкевич Г. В., Кормер С. Б. Письма ЖЭТФ, 1968, 7, 7, 12.
5. Dick R. D. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12, 6021.
6. Lysne P. C. J. Chem. Phys., 1971, 55, 11, 5242.
7. Cook M. A., Rogers L. A. J. Appl. Phys., 1957, 26, 4, 817.
8. Кормер С. Б. УФН, 1963, 94, 4, 641.
9. Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Афанасенков А. Н. и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 4, 807.
10. Афанасенков А. Н., Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 392.
11. Dick R. D. J. Chem. Phys., 1981, 74, 1, 4053.
12. Van Thiel M. Compendium of Shock Wave Data. Univ. of California, Livermore, 1966.
13. McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Rev. Sci. Instr., 1982, 53, 2, 245.
14. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. Хим. физика, 1984, 3, 7, 1036.
15. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. ПМТФ, 1969, 4, 137.
16. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
17. Воскобойников И. М. Докт. дис.— М.: ИХФ АН СССР, 1970.
18. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. ФГВ, 1978, 14, 3, 105.
19. Badd St. E. Rev. Mod. Phys., 1963, 35, 2, 400.

Поступила в редакцию 21/1 1987

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ИМПУЛЬСА ПРИ ВЗРЫВЕ НАКЛАДНОГО ЗАРЯДА

А. Е. Войтенко, Э. А. Зельдина
(Днепропетровск)

Расчет импульса на подложку при взрыве накладного заряда рассматривался в работах [1—4]. Решением вариационной задачи при фиксированных массе и энергии заряда для одномерного разлета продуктов взрыва (ПВ) установлен фундаментальный факт наличия максимального импульса

$$I_* = \sqrt{2\varepsilon} M, \quad (1)$$

где ε — удельная энергия взрыва; M — масса заряда [1].

Указанный теоретический предел достигался бы при выполнении двух условий: разлет продуктов взрыва в одном направлении и с одинаковой скоростью элементарных объемов («стационарный разлет») [1]. В действительности оба эти условия нарушаются. Реальный импульс I удобно нормировать на I_* , вводя в рассмотрение безразмерный импульс [1]:

$$\eta = I/I_*, \quad 0 < \eta < 1. \quad (2)$$

В работе [1] аналитически для одномерного случая показано, что значение $\eta = 0,866 \div 0,799$ слабо зависит как от показателя изоэнтропы ПВ ($k = 3 \div 1$), так и от принятой модели детонации (мгновенная, к подложке, от подложки). Нетрудно показать, что в упрощенной схеме разлета продуктов взрыва по Гарни [3] с однородной плотностью и с линейным распределением скорости от нулевой у подложки до максимальной на свободной границе $\eta = 0,86$. В более сложных случаях двумерного разлета ПВ аналитический расчет не возможен, и для определения им-