

ДИНАМИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ КАРБАМИДА ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Ю. М. Литвинов, А. Н. Афанасенков

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

Электромагнитным методом определены ударные адиабаты прессованных образцов карбамида плотностью $1,29 \text{ г/см}^3$ и образцов карбамида насыпной плотности $0,78 \text{ г/см}^3$ в интервале давлений $1 \div 14 \text{ ГПа}$. Ударная адиабата прессованного карбамида в координатах D, U имеет линейный характер, а ударная адиабата карбамида насыпной плотности при давлении $\approx 2,4 \text{ ГПа}$ представлена в виде двух линейных отрезков: $D = 2U$ при $0,6 < U < 1,3 \text{ км/с}$ и $D = 0,6 + 1,55U$ при $1,3 < U < 2,8 \text{ км/с}$. Обсуждается возможность фазового перехода в карбамиде при ударном сжатии.

Ключевые слова: карбамид, сжимаемость, ударная адиабата, электромагнитный метод, ударная волна, биурет.

Изучение чувствительности пористых взрывчатых веществ (ВВ) к ударной волне имеет как практическое, так и теоретическое значение: устанавливаются пределы иницирования детонации ВВ, условия безопасного хранения и использования ВВ; исследуются причины образования очагов реакции (горячих точек), разогрев ВВ в очагах и механизм перехода иницирующей ударной волны (УВ) в детонационную. Самостоятельный интерес представляет получение уравнения состояния вещества при низких давлениях УВ ($p = 0,1 \div 10 \text{ ГПа}$). Однако уже одна из первых работ по иницированию детонации пористых ВВ [1] показала, что изучение этого процесса — довольно сложная задача. Дело в том, что ВВ взрывается при очень низких давлениях (тэн насыпной плотности взрывается при давлении УВ $0,4 \div 0,5 \text{ ГПа}$) и интервал измеряемых давлений очень мал. В этом интервале на результаты измерений сильно влияют флуктуации исходных параметров (плотность заряда, дисперсность ВВ, размеры заряда и др.), что требует применения высокоточных методов измерения волновых и массовых скоростей. Поэтому нередко пористые органические ВВ моделируют пористыми инертными органическими веществами, свойства которых близки к свойствам ВВ.

В настоящей работе изучалась динамическая сжимаемость карбамида (мочевина) — $\text{OC}(\text{NH}_2)_2$. Карбамид широко применяется в сельском хозяйстве и промышленности [2] в си-

лу своей доступности и уникальных свойств. В частности, карбамид используется в качестве горючего компонента в промышленных горючелюющих взрывчатых составах типа карбатов [3]. Как указано в [4, 5], его использование позволяет довести содержание воды в составах до 3 %, а содержание тротила — до 10 % или вовсе исключить его. Введение карбамида приводит к снижению температуры плавления нитрата аммония (НА) до $60 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и к снижению температуры кристаллизации всего состава, что обеспечивает необходимую текучесть карбатов и уменьшает опасность преждевременной кристаллизации составов в коммуникациях зарядных машин, сокращаются также затраты энергии на приготовление составов. Последнее обстоятельство делает возможным приготовление карбатов на месте проведения взрывных работ. Однако, несмотря на широкое применение в технике, некоторые свойства карбамида и карбатов, знать которые необходимо для безопасного использования и надежного взрывания зарядов карбатола, не изучались. Нет данных по чувствительности карбатов к УВ, которые необходимы для правильного выбора зарядов-боевиков с целью надежного иницирования полноценной детонации зарядов карбатов. (Критический диаметр детонации карбатов по данным работы [4] оценивается в $120 \div 160 \text{ мм}$, а по данным [3] — в $230 \div 260 \text{ мм}$.) Отсутствуют сведения о влиянии химических свойств карбамида на скорость детонации карбатола и его тер-

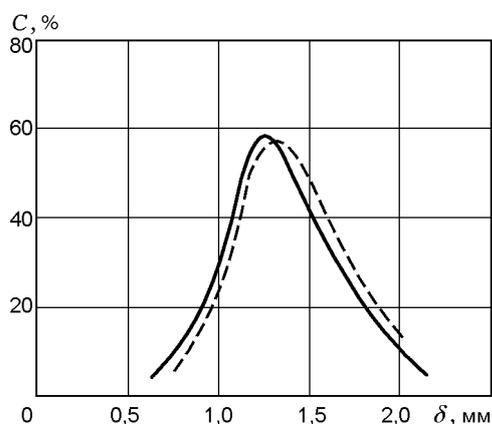


Рис. 1. Зависимость массовой доли (C) гранул карбамида конкретного диаметра от диаметра гранул:

сплошная и штриховая линии — образцы, взятые из двух разных мешков

мостойкость, о химической совместимости карбамида с другими компонентами карбатола и т. д.

В настоящей работе мы ограничились изучением динамической сжимаемости карбамида. Использовался гранулированный полидисперсный карбамид заводского изготовления. Проведен ситовый анализ образцов карбамида, взятых из двух различных мешков. Масса образцов 1000 г. Результаты гранулометрического анализа представлены на рис. 1. Видно, что распределение гранул по размерам для двух образцов, взятых из разных мешков, близки между собой и основную массу образцов составляют гранулы диаметром $\delta = 1,0 \div 1,75$ мм. Эти результаты взяты за основу, и ситовый анализ других партий заводского карбамида не проводился. Исследовались образцы карбамида насыпной плотности $0,78 \text{ г/см}^3$ и прессованного до плотности $1,29 \text{ г/см}^3$ *

Ударная сжимаемость определялась электромагнитным методом [7] в условиях действия УВ прямоугольного профиля на образцы карбамида. Использование такой волны позволяет надежно обнаруживать газодинамические эффекты, связанные с различными превращениями, которые могут происходить в веществе при ударном сжатии, и с влиянием боковых

* Промышленный карбамид выпускается в кристаллическом и гранулированном виде, он мало склонен к слеживанию. Плотность монокристалла $1,33 \text{ г/см}^3$, плотность гранул $1,25 \div 1,32 \text{ г/см}^3$, насыпная плотность гранул $0,76 \div 0,80 \text{ г/см}^3$ [6].

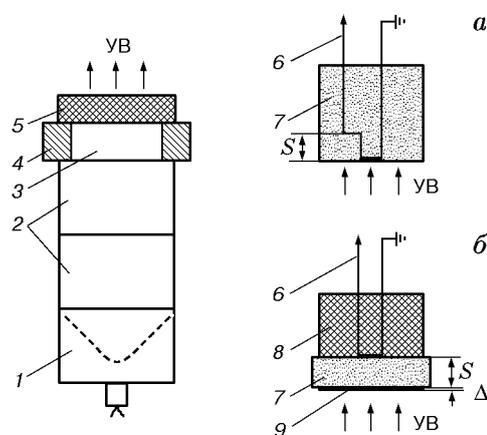


Рис. 2. Устройства для проведения эксперимента:

слева — генератор УВ, справа — измерительные узлы; 1 — взрывная линза плоского фронта, 2 — таблетки основного ВВ, 3 — воздушный зазор, 4 — деревянное кольцо, 5 — парафиновый экран, 6 — электромагнитный датчик, 7 — образец карбамида, 8 — парафиновый блок, 9 — диск из алюминиевой фольги (толщиной $\Delta = 0,1$ мм), S — база измерения: a — расстояние между перекладинами датчика; b — толщина таблетки карбамида

и тыльных волн разгрузки. Измерялись скорость фронта D и массовая скорость вещества U за фронтом УВ. Схема опыта приведена на рис. 2. Слева показано взрывное устройство, создающее УВ прямоугольного профиля (генератор УВ), справа — измерительные узлы. Узел «а» применялся для определения динамической сжимаемости образцов карбамида насыпной плотности, узел «б» — для прессованных образцов. При взрыве баратоловой линзы диаметром 80 мм в основном заряде, состоящем из двух таблеток ВВ толщиной 40 мм, инициировалась детонационная волна с плоским фронтом. При выходе волны на торец заряда продукты детонации истекали в воздушный зазор, ограниченный деревянным кольцом фиксированной высоты, и сжимали воздух. Воздушная УВ, движимая продуктами детонации, воздействовала на парафиновую преграду-экран и отражалась от нее. При взаимодействии в воздушном зазоре отраженных волн от границ раздела «продукты взрыва — воздух» и «воздух — парафин» в продуктах детонации создается такое распределение давления, что в парафиновый экран входит УВ с прямоугольным профилем давления, т. е. с постоянными значениями D и U . Время существования обла-

Таблица 1

Характеристики генераторов УВ прямоугольного профиля

Вариант генератора	ВВ	Плотность ВВ, г/см ³	Толщина воздушного зазора, мм	Толщина парафинового экрана, мм	U , м/с	$p_{\text{экс}}$	$p_{\text{расч}}$	τ , мкс
						ГПа		
1	ТНТ/талък*	1,40	25	20	0,32	0,70	—	6,6
2	ТНТ/талък*	1,60	25	20	0,46	1,10	1,3	7,7
3	ТНТ/талък*	1,60	16	20	0,56	1,65	2,0	4,2
4	ТНТ/талък*	1,60	7	20	0,72	2,28	—	1,7
5	ТНТ/талък*	1,60	10	15	0,77	2,45	2,40	3,8
6	ТНТ/талък**	1,60	16	15	1,00	3,75	3,95	3,5
7	ТНТ	1,44	16	15	1,40	6,40	6,25	3,0
8	ТНТ/Г 1/1	1,60	16	15	1,78	9,00	8,70	2,5
9	Гексоген (Г)	1,71	16	15	1,91	10,0	—	1,8
10	Г	1,71	10	10	2,30	13,0	13,0	—

Примечание. *Состав 50/50, **состав 70/30.

сти постоянных параметров УВ (плато) τ определялось временем догона боковой или тыльной волны разгрузки фронта УВ. Эта волна и воздействует на образец карбамида. В образец карбамида насыпной плотности помещался электромагнитный датчик ступенчатой формы из полоски алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм и шириной 10 мм [8] (узел «а»). Длина каждой перекладки составляла 10 мм, расстояние между перекладками (база измерения скорости D) $S = 10$ мм. Наличие двух перекладок давало возможность в одном опыте регистрировать независимо величины D и U . Размер базы и толщина парафиновой преграды были выбраны по результатам контрольных опытов. В этих опытах вместо карбамида использовался сплошной образец парафина толщиной 40 мм, в котором определялась зависимость массовой скорости от толщины слоя парафина между датчиком и воздушным зазором и высоты самого зазора. На первом участке полученной зависимости скорость U имеет постоянное значение (плато), ширина участка примерно $15 \div 25$ мм, время существования плато τ . На втором участке значение U уменьшалось с увеличением толщины слоя парафина из-за влияния волн разгрузки.

В работе применялись взрывные устройства, которые позволяли создавать в парафиновом экране УВ прямоугольного профиля, ин-

тенсивность которых изменялась в диапазоне $1,0 \div 13,0$ ГПа. Это достигалось простым изменением плотности или состава заряда взрывного устройства. В экспериментах в качестве ВВ использовались тротил, гексоген, их смесь ТГ 50/50 и смеси тротила с тальком. Параметры взрывных устройств приведены в табл. 1. Большинство из них заимствовано из работы [9]. Устройства 2 и 10 разработаны авторами настоящей работы. В опытах с прессованными образцами карбамида применялось то же взрывное устройство (генератор УВ прямоугольного профиля, рис. 2), но использовался обычный электромагнитный датчик П-образной формы, который ставился на внешний торец образца карбамида и заливался парафином (узел «б»). На границу раздела между парафиновым экраном и карбамидом помещался диск из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм. В таком варианте датчик выполнял двойную функцию. Во-первых, он фиксировал электромагнитный сигнал от наведенных в диске круговых токов в момент прохождения через него УВ, т. е. работал как антенна-приемник. Во-вторых, при прохождении УВ через датчик он работал по своему первоначальному предназначению, т. е. фиксировал изменение массовой скорости вещества во времени, $U = U(t)$. Преимуществом этого способа является то, что используется хорошо изучен-

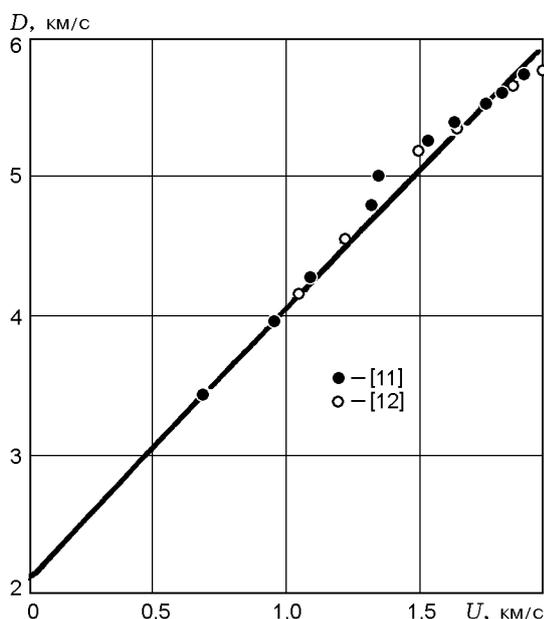


Рис. 3. Ударная адиабата парафина:

точки — данные [11, 12], линия — расчет по обобщенной зависимости $D = c_0 + 2U - 0,1U^2/c_0$, $c_0 = 2,05$ км/с

ный обычный П-образный датчик, а не ступенчатый и он располагается вне образца изучаемого вещества, не нарушая его сплошности. Этот вариант электромагнитного метода разработан авторами работы [10]. По этим двум сигналам определяли время прохождения УВ по образцу карбамида и (поскольку толщина образца известна — $S = 5 \div 10$ мм) скорость УВ D . Затем методом отражения находили величину U в карбамиде на границе раздела «парафиновый экран — образец карбамида». Давление УВ в экране при используемом конкретном взрывном генераторе известно, оно приведено в табл. 1. Известна и ударная адиабата парафина, она показана на рис. 3 (по данным [11, 12]). Значение массовой скорости, измеряемое датчиком на заднем торце прессованной таблетки карбамида, служило для контроля.

Типичные осциллограммы приведены на рис. 4 для образцов насыпной плотности $0,78$ г/см³ и образцов плотностью $\rho_0 = 1,29$ г/см³ при двух значениях давления УВ в парафиновом экране: $p = 1,65$ и 13 ГПа. На осциллограммах для прессованных образцов ясно видны части сигнала отрицательной полярности от наводки в тонкой алюминиевой пластине и положительной полярности, последняя свидетельствует о начале движения дат-

Таблица 2
Параметры ударного сжатия образца карбамида
плотностью $\rho_0 = 0,78$ г/см³

Вариант генератора	D , км/с	U , км/с	p , ГПа
2	1,31	0,71	0,73
3	1,70	0,82	1,09
5	1,82	0,95	1,35
6	2,60	1,18	2,39
7	3,19	1,72	4,28
8	3,79	2,18	6,44
8	3,96	2,19	6,76
10	4,80	2,73	10,2
10	4,75	2,75	10,2

чика со скоростью U . Как видно, для насыпного и прессованного карбамида при низких и высоких давлениях на осциллограммах $U(t)$ имеется плато. Это означает, что величина U постоянна и каких-либо фазовых переходов или заметного химического разложения карбамида, сопровождаемых изменением объема, не наблюдается. Можно отметить, что осциллограммы $U(t)$ в случае образцов насыпной плотности имеют отличительную особенность — волнообразный характер плато. Это, на наш взгляд, обусловлено грубодисперсной структурой исходного карбамида. Точность определения D составляет $\approx 1\%$, а U — $2 \div 4\%$ в зависимости от давления УВ.

Измеренные значения D и U при ударном сжатии образцов карбамида насыпной плотности приведены в табл. 2 и на рис. 5. В табл. 2 указаны также значения давления в карбамиде, рассчитанные по известной формуле $p = \rho_0 D U$. Как видно из табл. 1, значения давления УВ в парафиновом блоке, измеренные в экспериментах и рассчитанные методом отражения с использованием полученной ударной адиабаты карбамида и известной адиабаты парафина, достаточно хорошо согласуются между собой. Это позволило нам в дальнейшем использовать без проверки взрывные генераторы, параметры которых приведены в табл. 1, и измерять в экспериментах только скорость УВ в прессованных образцах карбамида, а значение U определять методом отражения. Получено три точки на ударной адиабате прессованного карбамида,

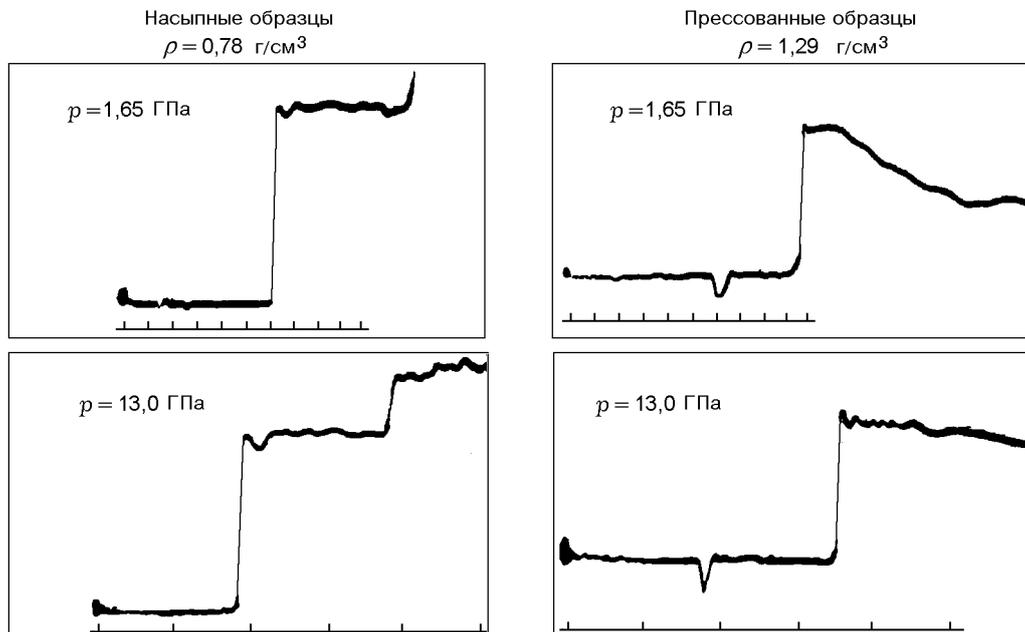


Рис. 4. Осциллограммы записи массовой скорости в УВ в образцах карбамида различной плотности и при различном давлении (время между метками 1 мкс)

результаты представлены в табл. 3 и на рис. 5 (кривая 2). Видно, что ударная адиабата прессованного карбамида практически линейна и ее можно описать соотношением $D = A + BU$, где $A = 1,60$ км/с, $B = 1,83$. Мы считаем, что ударная адиабата карбамида насыпной плотности имеет перегиб при $D \approx 2,56$ км/с и $U \approx 1,26$ км/с (кривая 1). Этому соответствует давление УВ, равное 2,4 ГПа (3,5 ГПа в парафине). Поэтому мы предлагаем представить эту ударную адиабату двумя линейными отрезками: $D = 2U$ при $0,6 < U < 1,3$ км/с и $D = (0,6 + 1,55U)$ при $1,3 < U < 2,8$ км/с. Отметим, что ударная адиабата насыпного карбамида похожа на ударную адиабату парафина. Авторы [11] считают, что в парафине при ударном сжатии происходит фазовый переход. Возможно, и в карбамиде насыпной плотности перегиб на зависимости $D(U)$ связан с фазовым переходом. В работе [13] было получено, что карбамид при статическом сжатии имеет два фазовых перехода — при $p = 2,0$ и 2,5 ГПа.

Для получения дополнительной информации по ударному сжатию карбамида был проведен расчет априори ударных адиабат карбамида при начальной плотности $\rho_0 = 1,33, 1,29$ и $0,78$ г/см³. Расчет проводился методом, изложенным в [14]. Ударная адиабата карбамида

при максимальной плотности ($\rho_{кр} = 1,33$ г/см³ [6]) рассчитывалась по обобщенной зависимости $D = c_0 + 2U - 0,1U^2/c_0$, где c_0 — объемная скорость звука вещества в начальных условиях. Поскольку значение c_0 для карбамида неизвестно, мы рассчитали его по правилу Рао [15] и в результате получили значение $c_0 = 2,24$ км/с. Таким образом, ударная адиабата кристаллического карбамида записывается в виде $D = 2,24 + 2U - 0,045U^2$ [км/с].

Для расчета ударной адиабаты пористого вещества предложена формула [14]

$$U_{пор}^2 = U^2 + (6/7)p(m-1)/\rho_0,$$

где $m = \rho_{кр}/\rho_{пор}$. Ее можно переписать в виде

$$U_{пор} = U \sqrt{1 + (6/7)(D/U)(m-1)}. \quad (1)$$

Из формулы (1) и соотношения $p = \rho_0 DU$ следует уравнение для скорости УВ в пористом образце:

$$D_{пор} = mD / \sqrt{1 + (6/7)(D/U)(m-1)}. \quad (2)$$

Анализ формулы (2) показывает, что при любой пористости образцов для слабых УВ $D \rightarrow 0$ при $U \rightarrow 0$. Это означает, что кривизна адиабат пористых образцов любой плотности при низких давлениях сильно меняется и все

Таблица 3
 Параметры ударного сжатия образца карбамида плотностью $\rho_0 = 1,29 \text{ г/см}^3$

Вариант генератора	D , км/с	U , км/с	p , ГПа	V , см ³ /г
3	2,63; 2,58	0,55; 0,51	1,87; 1,70	0,613; 0,622
7	4,05; 4,09	1,33; 1,30	6,95; 6,86	0,521; 0,529
10	5,33; 5,43	2,10; 2,07	14,4; 14,5	0,470; 0,480

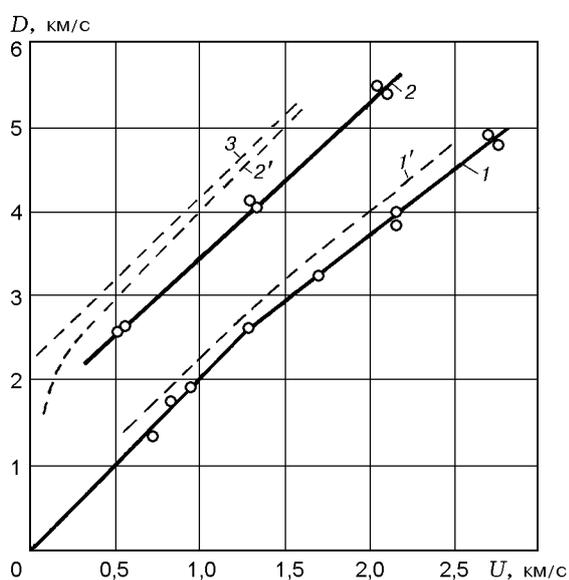


Рис. 5. Ударные адиабаты карбамида для образцов различной плотности:

1, 1' — $\rho_0 = 0,78 \text{ г/см}^3$, 2, 2' — $\rho_0 = 1,29 \text{ г/см}^3$, 3 — $\rho_0 = 1,33 \text{ г/см}^3$, 1, 2 — эксперимент, 1', 2', 3 — расчет

адиабаты сходятся в начало координат. В этой области небольшое изменение величины U приводит к значительному изменению D , т. е. точное измерение D становится затруднительным из-за большого разброса.

Результаты расчета ударных адиабат кристаллического ($m = 1$) и пористого карбамида при $\rho_0 = 1,29 \text{ г/см}^3$ ($m = 1,031$) и $\rho_0 = 0,78 \text{ г/см}^3$ ($m = 1,705$) приведены на рис. 5 (кривые 3, 2' и 1' соответственно). Как видно, расчетные и экспериментальные ударные адиабаты качественно подобны, расхождение между ними составляет примерно 10 %, т. е. наблюдается вполне удовлетворительное согласие результатов расчета и эксперимента. Подчеркнем, что в расчетах мы использовали только плотность монокристалла и структурную формулу карбамида (при расчете c_0).

Отметим два обстоятельства. Во-первых, экспериментальная ударная адиабата карбамида насыпной плотности имеет перегиб и ее мы представили двумя прямолинейными отрезками (см. выше). Наличие перегиба, подобного наблюдаемому для парафина, для пяти твердых органических кислот [16] свидетельствует о фазовом переходе. Он происходит без изменения объема и энергии и называется переходом второго рода. В этих переходах резко меняются теплоемкость и сжимаемость вещества. Возможен переход и в карбамиде. Во-вторых, расчетные адиабаты пористого карбамида лежат выше экспериментальных во всем исследованном интервале значений U . Можно предположить, что различие связано с какой-либо систематической ошибкой либо расчета, либо эксперимента, но это маловероятно, поскольку метод расчета построен по результатам статистической обработки экспериментальных данных по ударной сжимаемости более чем двух десятков органических веществ, а надежность метода измерений подтверждена данными табл. 1. Возможно, что расчетная скорость звука карбамида является завышенной.

Наиболее вероятно предположение, что при ударном сжатии в карбамиде происходит какое-то химическое превращение либо фазовый переход с уменьшением объема. Из литературных данных [6] известно, что при нагревании карбамид легко конденсируется с образованием либо биурета при температуре $150 \div 160 \text{ }^\circ\text{C}$ (соединяются две молекулы карбамида), либо циануровой кислоты при более высокой температуре (соединяются три молекулы карбамида). Выше уже отмечалось, что карбамид испытывает два фазовых перехода при статическом сжатии. При ударном сжатии присутствуют оба фактора: и повышенное давление, и повышенная температура.

По аналогии с карбамидом проведен расчет ударных адиабат биурета $\text{HN}(\text{CONH}_2)_2$,

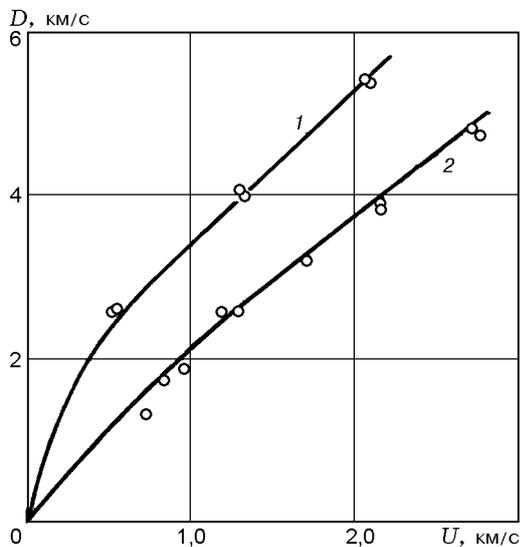


Рис. 6. Рассчитанные ударные адиабаты биурета при $\rho_0 = 1,29$ (кривая 1) и $0,78 \text{ г/см}^3$ (кривая 2):

точки — эксперимент для карбамида

промежуточного продукта конденсации карбамида. По данным работы [17] начальная плотность биурета принята равной $1,46 \text{ г/см}^3$; скорость звука c_0 , рассчитанная по правилу Рао, равна $2,13 \text{ км/с}$. На рис. 6 приведены рассчитанные ударные адиабаты биурета при плотностях $1,29$ и $0,78 \text{ г/см}^3$ и данные экспериментов, полученные нами для карбамида (см. табл. 2, 3). Наблюдается очень хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных (для разных веществ). Результат неожиданный. Отметим также, что в случае биурета никаких экспериментальных данных не было использовано. Предположение о том, что при ударном сжатии в карбамиде протекает реакция конденсации, обретает реальность. В дальнейшем предполагается определить ударную адиабату чистого биурета и подтвердить наличие перегиба на ударной адиабате карбамида насыпной плотности.

В заключение отметим следующее обстоятельство. При определении ударных адиабат сплошных веществ справедливо полагается, что получаемая экспериментально ударная адиабата — равновесная, т. е. температура и давление в веществе по сечению образца постоянны и могут быть рассчитаны с использованием уравнения состояния вещества. В случае пористого образца термическое равновесие при ударном сжатии не устанавливается, в «горячих» точках (соударение микроволн, трение

между зернами, разогрев при вязком течении вещества и др.) температура выше, чем внутри зерен вещества. Время установления теплового равновесия по всему сечению образца τ_T оценим по соотношению $\tau_T \approx l^2/\chi$, где l — размер частицы вещества, χ — температуропроводность. Приняв $l \approx 0,1 \text{ мм}$, $\chi \approx 1 \text{ мм}^2/\text{с}$, получаем $\tau_T \approx 0,01 \text{ с}$. Время регистрации движения УВ порядка 10 мкс (радиус образца 40 мм), что меньше в 10^3 раз. Это указывает на неравновесность ударной адиабаты пористого вещества. На p, V -диаграмме адиабаты сплошного и пористого веществ не должны совпадать [18, гл. XI, § 10]. Это подтверждается и нашими результатами (в координатах p, V ударные адиабаты карбамида при плотности $1,29$ и $0,78 \text{ г/см}^3$ не совпадают). Противоположный результат приведен в [19]. При изучении динамической сжимаемости уротропина было получено, что адиабаты пористых образцов уротропина при $m = 1,01$ и $1,62$ на p, V -диаграмме совпадают друг с другом до давления $6,0 \text{ ГПа}$ и с кривой изотермического сжатия до давления $3,0 \text{ ГПа}$. Это означает, что поры в зарядах сжимаются до нулевого объема и устанавливается термическое равновесие, что не согласуется с вышеприведенными оценками. Это обстоятельство не обсуждается. По-видимому, в [19] содержится систематическая ошибка при измерении скорости УВ. Если принять, что адиабата пористого карбамида действительно неравновесная, то можно предположить, что биурет или даже циануровая кислота образуются в «горячих» точках и собственно измеряемая ударная адиабата относится к смеси карбамида и продукта его конденсации. Возможны также превращения карбамида уже при приготовлении (при прессовании) образцов при плотности $1,29 \text{ г/см}^3$. Данный вопрос, по-видимому, еще никем не обсуждался. Отмеченные обстоятельства будут предметом дальнейших исследований.

Итак, экспериментально определены ударные адиабаты карбамида при плотностях $1,29$ и $0,78 \text{ г/см}^3$. Сравнение их с расчетными адиабатами карбамида и биурета показало, что с большой вероятностью при ударном сжатии карбамид превращается в биурет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seay G. E., Seely L. B. Initiation of a low-density PETN pressing by a plane shock wave // J. Appl. Phys. 1961. V. 32, N 6. P. 1092.

2. Кучерявый В. И., Лебедев В. В. Синтез и применение карбамида. Л.: Химия, 1970.
3. Байбуров В. П., Анаскин Н. А., Рыжова Т. А. и др. Эффективность применения карбатов // Взрывное дело. № 80/37. М.: Недра, 1978.
4. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988.
5. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. М.: Недра, 1977.
6. Химическая энциклопедия. Т. 3. М.: Большая Рос. энцикл., 1992.
7. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. Электромагнитный метод измерения скорости продуктов взрыва // Докл. АН СССР. 1960. Т. 132, № 6. С. 1339–1340.
8. Дремин А. Н., Першин С. В., Погорелов В. Ф. Структура ударных волн в КСl и КВг при динамическом сжатии до 200 тыс. атм // Физика горения и взрыва. 1965. Т. 1, № 4. С. 3–9.
9. Колдунов С. А., Шведов К. К., Дремин А. Н. Разложение пористых ВВ под действием ударных волн // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 295–304.
10. Колдунов С. А., Литвинов Ю. М. Об одном способе регистрации скорости распространения ударных волн // Химическая физика процессов горения и взрыва: XII Симпозиум по горению и взрыву. Ч. II. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. С. 139–141.
11. Дремин А. Н., Карпухин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. 1960. № 3. С. 184–188.
12. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупников В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152.
13. Bridgman P. W. Polymorphic transitions up to 50000 Kg/Cm² of several organic substances // Proc. Amer. Acad. Arts and Sci. 1938. V. 72, N 6. P. 227–268.
14. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. Обобщенная ударная адиабата конденсированных веществ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 137–141.
15. Rao R. Velocity of sound in liquids and chemical constitution // J. Chem. Phys. 1941. V. 9, № 9. P. 682.
16. Трунин Р. Ф., Жерноклетов М. В., Дорохин В. В., Сычевская Н. В. Сжатие твердых органических кислот и ангидридов в ударных волнах // Хим. физика. 1992. Т. 11, № 4. С. 557–562.
17. Kurzer F. Biuret and related compounds // Chem. Rev. 1956. V. 56, N 1. P. 95–197.
18. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963.
19. Боболев В. К., Буров В. А., Дубовик А. В. Сжимаемость порошкообразного уротропина // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 1. С. 124–126.

*Поступила в редакцию 24/VII 2002 г.,
в окончательном варианте — 12/XI 2003 г.*