

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНЫХ АДИАБАТ ДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Н. Дремин, И. А. Карпухин

(Москва)

Предложен метод, позволяющий снимать ударные адиабаты сильно неоднородных веществ (например, гранита).

Изучение сжимаемости смеси, состоящей из вещества с известной ударной адиабатой и измельченного неоднородного вещества, дает сведения о суммарной сжимаемости всех компонентов последнего. Рассматривается применимость ударного метода для изучения объемного или продольного сжатия кристаллических тел при слабых амплитудах ударной волны.

§ 1. Описание метода. Изучению динамической сжимаемости различных материалов в виде сплошных блоков под воздействием мощных ударных волн, создаваемых детонацией взрывчатых веществ, посвящен ряд работ. Если брать вещество с какой-либо степенью пористости, то, как показано в работе [1], получается ударная адиабата, не совпадающая с ударной адиабатой сплошного материала. Ниже излагается метод, позволяющий на основании испытания образцов материала в дисперсном состоянии получить ударную адиабату, соответствующую сплошному состоянию этого материала.

Суть метода заключается в следующем. Составляется однородная монолитная смесь из двух веществ: вещества с известной ударной адиабатой 1 и исследуемого вещества 2. В этом случае для плотности смеси  $\rho_{12}$  имеем соотношение:

$$\rho_{12} = \frac{\rho_1 \rho_2}{x \rho_2 + (1-x) \rho_1} \quad (1.1)$$

где  $\rho_1$  — плотность вещества с известной ударной адиабатой;  $\rho_2$  — плотность исследуемого вещества и  $x$  — концентрация компонента с известной ударной адиабатой, которая определяется из выражения (1.1) при известных начальных плотностях  $\rho_{012}$ ,  $\rho_{01}$  и  $\rho_{02}$ . Соотношение (1.1) справедливо при любой степени сжатия с учетом сжимаемости компонентов. Очевидно, что за фронтом ударной волны давление  $p$  в обоих компонентах будет одинаковым. По давлению  $p$  рассчитывается плотность ударного сжатия первого компонента  $\rho_1$ , так как его ударная адиабата предполагается известной. Измеряя плотность ударного сжатия смеси  $\rho_{12}$ , можно по выражению (1.1) рассчитать  $\rho_2$ . Скорость фронта ударной волны  $D_2$  и скорость вещества за фронтом  $u_2$  вычисляются в этом случае по формулам:

$$D_2 = \sqrt{\frac{p \rho_2}{\rho_{02} (\rho_2 - \rho_{02})}}, \quad u_2 = \sqrt{\frac{p (\rho_2 - \rho_{02})}{\rho_{02} \rho_2}} \quad (1.2)$$

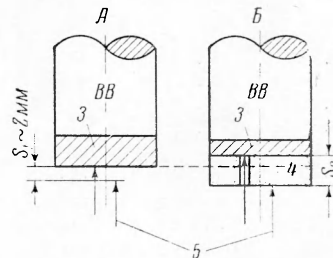
Необходимо отметить, что применение изложенного метода оправдано в определенном интервале размеров частиц смешиваемых компонентов. Частицы не могут быть крупными, так как при этом возможно заметное искажение фронта ударной волны (за счет разновременности прохождения ударной волны по различным веществам), что скажется на точности измерения его скорости.

Снизу размер частиц также ограничен по следующим соображениям. Состояние вещества при ударном сжатии определяется тепловым и упругим взаимодействием его атомов и молекул. Очевидно, что для различных веществ соотношения упругих и тепловых составляющих давления и энергии различно. Поэтому на границе двух веществ, сжатых до одного давления, может существовать градиент температуры, и размеры частиц должны быть такими, чтобы за характерное время эксперимента ( $\sim 10^{-8}$  сек.) этот градиент не успевал заметно сглаживаться. Если известно время процесса  $\tau$  и температуропроводность материала  $\chi$ , можно оценить размер прогреваемой частицы  $l \sim \sqrt{\chi \tau}$ . Для непроводников за время  $\sim 10^{-8}$  сек. величина прогреваемых частиц равна  $\sim 0.5-1.0$  м. В данной работе величина частиц была  $50-100$  м, а расстояние между этими частицами, т. е. характерный размер другого компонента, было равно  $15-20$  м, так что можно считать, что второе условие было выполнено. С данным размером частиц хорошо выполняется и первое условие. Разновременность в прохождении ударной волны по частицам разного вещества при этом составляет  $\sim 10^{-10}$  сек., что значительно меньше точности, с которой использованный в данной работе осциллограф регистрирует момент времени.

Кроме размера частиц смешиваемых компонентов имеет значение также и соотношение их динамических жесткостей; динамической жесткостью называется произведение начальной плотности среды на скорость распространения фронта ударной волны в этой среде  $\rho_0 D$ . От этого соотношения зависит амплитуда отраженной волны, которая возникает на границе раздела сред (в рассматриваемом случае между частицами различных компонентов в массе смеси). Это приводит к тому, что оба компонента одновременно ( $\sim 10^{-8}$  сек.) подвергаются воздействию давления, отличного от среднего давления  $p$ , которое быстро устанавливается за фронтом ударной волны, распрост-

раняющейся по смеси, вследствие малых размеров частиц обоих компонентов (компонент с меньшей динамической жесткостью подвергается двукратному сжатию, а компонент с большей динамической жесткостью — однократному сжатию, но до давления, большего среднего давления  $p$ ). Так как нагрузка при этом происходит по ударным адиабатам, а разгрузка — по изэнтропам, очевидно, что часть энергии ударного сжатия будет оставаться в частицах, что, казалось бы, не дает права пользоваться в расчетах ударной адиабатой компонента 1 и приводит к неправильному определению ударной адиабаты компонента 2.

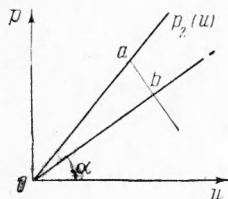
Однако, как показано в работе [2], при небольшом перепаде давления (в рассматриваемом случае — при небольшом отклонении от среднего) адиабата двукратного сжатия, а также изэнтропа расширения практически совпадают с адиабатой однократного сжатия. Отсюда вывод: для того чтобы перепад давления был мал, необходимо выбирать компоненты с близкими значениями динамических жесткостей.



Фиг. 1. ВВ — заряд взрывчатого вещества, 3 — материал с известной ударной адиабатой, 4 — исследуемое вещество, 5 — электроконтактные датчики,  $S_1$  и  $S_2$  — базы измерения  $w$  и  $D$  соответственно

Давление  $p$  и плотность ударного сжатия смеси  $\rho_{12}$  измерялись в данной работе методом отражения, описанным в работах [2, 3].

В этом методе ударная волна из среды 3 с известной ударной адиабатой (фиг. 1) переходит в исследуемую среду 4. В этом случае достаточно измерить в исследуемой среде только один параметр ударной волны — скорость распространения ее фронта  $D$ . На плоскости  $ip$  (фиг. 2) состояние обеих сред при этом переходе определяется общей точкой  $b$  пересечения волновой прямой  $Ob$  исследуемой среды с кривой расширения  $ab$  (изэнтропа Пуассона) среды 3. Как сказано выше, при малых перепадах давления между



Фиг. 2.  $p_2(u)$  — ударная адиабата среды 3,  $Ob$  — волновая прямая исследуемого вещества 4,  $ab$  — изэнтропа расширения среды 3 из состояния  $a$ ,  $\text{tg } \alpha = \rho_0 D$

точками  $a$  и  $b$  кривая расширения  $ab$  практически совпадает с зеркальным отражением ударной адиабаты. Тангенс угла наклона волновой прямой  $Ob$  исследуемой среды равен  $\rho_0 D$ .

Таким образом, для нахождения точки  $b$  необходимо знать, кроме скорости ударной волны в исследуемой среде  $D$ , координаты точки  $a$ . В качестве среды 3 в настоящей работе использован алюминий, ударная адиабата которого заимствована из работы [4]

$$D_{A1} = 5.190 + 20.77 \log \left( \frac{w + 10.895}{10.895} \right) \text{ км/сек} \quad (1.3)$$

Здесь  $D_{A1}$  — скорость ударной волны в алюминиевой пластинке;  $w_{A1}$  — скорость движения ее свободной поверхности в (км/сек), которая, как показано в работах [1, 5], равна удвоенной массовой скорости, т. е.  $w_{A1} = 2u_{A1}$ . Для определения координат точки  $a$  достаточно, таким образом, измерить  $w_{A1}$  или  $D_{A1}$ . На фиг. 1 приведены принципиальные схемы постановки опытов по измерению  $w$  (А) и  $D$  (Б).

Регистрация временных интервалов во всех опытах проводилась на электронно-лучевом осциллографе со спиральной разверткой ОК-15М. Осциллограф позволяет отсчитывать время с точностью  $\pm 0.5 \cdot 10^{-9}$  сек.

При проведении 5—10 опытов средняя относительная ошибка в измерении  $D$  и  $w$  порядка 0.5%, что приводит к относительной ошибке в определении давления  $p$ , равной 1%. Максимальная относительная ошибка в определении плотности ударного сжатия однородных веществ в этом случае составляет  $\sim 1.5\%$  при максимальном достигнутом давлении. С понижением давления эта ошибка несколько уменьшается. Оценка относительной ошибки определения сжимаемости неизвестной компоненты в смеси по формуле (1.1) показывает, что эта ошибка зависит от соотношения плотностей компонентов и их процентного содержания. Так, для смеси парафин-мрамор ( $\sim 25 : 75$  по весу) эта ошибка  $\sim 3\%$ .

§ 2. Экспериментальные результаты. а) Ударная адиабата парафина. Для проверки справедливости предложенного метода ударная адиабата парафина (начальная плотность  $\rho_0 = 0.91 \text{ г/см}^3$ ) была снята как на образцах из чистого парафина, так и на основе изучения ударной сжимаемости смеси парафина с мрамором, ударная адиабата которого была определена ранее [3].

В табл. 1 приведены данные, полученные на образцах из чистого парафина.

Таблица 1

$D$ км сек	$u$ км сек	$p \cdot 10^9$ бар	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$D$ км сек	$u$ км сек	$p \cdot 10^9$ бар	$\frac{\rho}{\rho_0}$
3.44	0.70	22	1.255	5.35	1.64	80	1.440
3.97	0.95	34	1.320	5.51	1.80	90	1.49
4.29	1.08	42	1.335	5.58	1.87	98	1.505
4.80	1.30	57	1.365	5.72	1.96	104	1.525
5.01	1.35	62	1.370	5.97	2.16	118	1.570
5.23	1.55	74.5	1.425	6.64	2.70	165	1.685

В табл. 2 приведены данные по сжимаемости смеси парафин-мрамор, а также параметры ударной волны в парафине, рассчитанные по этим данным.

Таблица 2

## Параметры ударной волны

$x\%$	в смеси парафин-мрамор					в парафине				
	$\rho_{012} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D_{12} \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$u_{12} \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$p_{12} \cdot 10^9$ бар	$\rho_{12} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$u \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$p \cdot 10^9$ бар	
77.3	1.866	3.56	0.59	39.5	2.29	4.17	1.04	1.335	39.5	
74.8	1.805	3.87	0.73	51	2.22	4.59	1.22	1.360	51	
72.3	1.747	4.31	0.93	71	2.23	5.17	1.51	1.415	71	
77.4	1.867	4.47	0.97	81	2.39	5.35	1.66	1.450	81	
78.0	1.885	4.30	1.09	97	2.46	5.64	1.89	1.505	97	
78.0	1.885	4.93	1.13	105	2.45	5.77	2.01	1.535	105	
74.9	1.807	5.31	1.59	153	2.58	6.50	2.59	1.610	153	
78.0	1.885	5.70	1.65	194	2.65	7.05	3.03	1.755	194	
79.0	1.91	6.19	2.15	254	2.93	7.77	3.59	1.86	254	

Смесь приготавливалась следующим образом. В определенное количество расплавленного парафина насыпалась навеска мраморного порошка; полученная смесь заливалась в цилиндрическую форму. После застывания парафина, точным взвешиванием всей полученной отливки в воде определялась ее средняя плотность. Как правило, эта плотность совпадала с плотностью, рассчитанной по формуле (1.1), что означало отсутствие воздуха в отливке. Пластины непосредственно для опытов вырезались из нижней части отливки, где порошок мрамора располагался наиболее однородно.

На графике фиг. 3 экспериментальные данные приведены в координатах  $D$  и  $u$ . Каждая точка является средним из 5—10 опытов.

Как видно из графика, точки для парафина, полученные как на однородных образцах, так и на образцах из смеси парафин-мрамор, хорошо ложатся на одну зависимость. Это подтверждает справедливость предложенного метода.

Ударная адиабата парафина имеет две различные области. В первой (нижней) области адиабата имеет вид

$$D = (1.81 + 2.31 u) \text{ км/сек} \quad (2.1)$$

а во второй (верхней) области:

$$D = (3.32 + 1.24 u) \text{ км/сек} \quad (2.2)$$

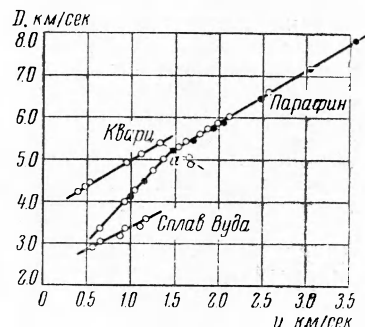
Точка излома  $a$  на плоскости  $uD$  определяется пересечением двух прямых (2.1) и (2.2). Координаты этой точки:  $u = 1.41 \text{ км/сек}$ ,  $D = 5.07 \text{ км/сек}$ ,  $p = 65 \cdot 10^9 \text{ бар}$ .

Такое поведение парафина следует объяснить его фазовым превращением. Следует отметить, что этот переход происходит без изменения объема и энергии. Из физики известно, что такие переходы называются переходами второго рода. В этих переходах претерпевают резкий скачок производные энергии и объема, т. е. резко изменяются теплоемкость и сжимаемость вещества.

б) Ударная адиабата кварца и сплава Вуда. Ударная адиабата кварца (SiO<sub>2</sub>) с начальной плотностью  $\rho_0 = 2.65 \text{ г/см}^3$  была рассчитана по данным сжимаемости смеси парафин-кварц. Экспериментальные данные приведены в табл. 3 и на графике фиг. 3. Как видно из графика, точки хорошо ложатся на прямую линию. Уравнение этой прямой:

$$D = (3.71 + 1.24 u) \text{ км./сек} \quad (2.3)$$

Фиг. 3. Зависимость скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $u$  для кварца, парафина и сплава Вуда. На адиабате парафина: ● — данные, полученные на основе изучения сжимаемости смеси парафин-мрамор, ○ — данные, полученные на образцах из чистого парафина. Точка  $a$  соответствует фазовому переходу в парафине



Необходимо, однако, отметить, что две точки в верхней части графика резко выпадают с приведенной зависимости. Эти точки получены ударными волнами с максимальной амплитудой, достигнутой при непосредственном контакте мощного взрывчатого вещества (гексоген с плотностью  $\sim 1.80 \text{ г/см}^3$ ) и исследуемого материала.

Таблица 3

Параметры ударной волны

x %	в смеси парафин-кварц					в кварце			
	$\rho_{012} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D_{12} \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$u_{12} \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$p_{12} \cdot 10^9 \text{ бар}$	$\rho_{12} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$u \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	$\frac{\rho}{\text{г}^3}$	$p \cdot 10^9 \text{ бар}$
23	1.84	3.63	0.59	39.5	2.20	4.16	0.36	1.095	39.5
23.7	1.825	3.94	0.715	51.5	2.23	4.27	0.455	1.12	51.5
21.7	1.875	4.99	1.395	131.5	2.60	4.91	1.01	1.26	131.5
20.8	1.897	5.28	1.555	156	2.69	5.09	1.16	1.29	156
23.7	1.825	5.59	1.84	187.5	2.72	5.34	1.325	1.33	187.5
19.6	1.927	4.82	0.525	49	2.16	4.22	0.44	1.12	49
23.2	1.835	5.92	2.06	224	2.81	4.95	1.75	1.52	224
20.6	1.90	5.04	2.15	230	3.07	5.16	1.68	1.48	230

По-видимому, в этой области кварц испытывает фазовый переход с большим изменением объема. Для установления величины этого перехода необходимо создавать в исследуемых образцах еще более сильные волны. С этой целью в качестве среды с известной ударной адиабатой предполагалось использовать сплав Вуда (Bi 50%, Pb 25%, Sn 12.5% и Cd 12.5%, начальная плотность сплава  $9.7 \text{ г/см}^3$ ). Фактически в исследуемой среде измеряются параметры отраженной волны. Но чем больше динамическая жесткость материала, тем выше амплитуда отраженной волны. Этим и определялся выбор сплава Вуда.

Так как ударная адиабата сплава Вуда неизвестна, она была определена вышеуказанным методом отражения. Полученные результаты представлены на графике фиг. 3. Уравнение прямой для сплава Вуда в координатах ( $D$  и  $u$ ) следующее

$$D = (2.31 + 1.03 u) \text{ км / сек} \quad (2.4)$$

Эта прямая справедлива в интервале давлений от 150 000 до 400 000 атм. При получении ударной адиабаты сплава Вуда в качестве среды  $\text{З}$  (см. фиг. 1) была использована медь, ударная адиабата которой взята в работе [6].

К сожалению, сплав Вуда не удалось использовать для определения ударной адиабаты кварца, так как из-за большого различия в плотностях этих веществ не удалось составить однородную смесь. При помещении кварца в расплавленный сплав Вуда он всплывает. Однако сплав Вуда может быть применен при изучении ударной сжимаемости веществ с плотностью близкой и большей его плотности.

Поступила 29 VII 1960

$$\sigma = \frac{r}{\lambda} \quad \left( \lambda = \sqrt{\frac{q_1}{\rho_0}} \right)$$