

Вещество	$C$ , км/с	$S$	$V_0$ , см <sup>2</sup> /г	$A$ , кбар	$G_0$
Плексиглас	2,572	1,536	0,8439	78	0,97
Медь	3,94	1,489	0,1120	1390	1,99
Алюминий	5,328	1,338	0,3591	791	2,00
Бериллий	7,998	1,124	0,5405	1180	1,16

$n$  падает с давлением на ударной адиабате от значения  $4S-1$  до  $2S-1$  при  $\pi \rightarrow \infty$ .

Потенциалом (1), по-видимому, можно пользоваться для описания изэнтропических течений в широком диапазоне давлений. Так, по имеющимся экспериментальным данным для случая сжатия воды ударными волнами ( $0 < \pi < 20$ ) вычислены показатель  $n(\pi)$ , который изменялся от 7,3 до 2,6 и скорость звука в ударно-сжатой воде, которая отличалась от данных [6] в диапазоне до 200 кбар не более чем на 5%. Изложенный подход может быть применен к исследованию отличных от (1) потенциалов.

Авторы признательны Г. А. Адаурову и Э. И. Андрианкину за обсуждение результатов и полезные замечания.

Поступила в редакцию  
3/V 1977,  
после доработки — 24/VI 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
2. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
3. В. Н. Жарков, В. А. Калинин. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М., «Наука», 1968.
4. В. П. Челышев, Б. И. Шехтер, Л. А. Шушко. ФГВ, 1970, 6, 2.
5. P. C. Chou, F. E. Allison. J. Appl. Phys., 1970, 37, 853.
6. M. H. Rice, J. M. Walsh. J. Chem. Phys., 1957, 26, 824.
7. High-Velocity Impact Phenomena. New York — London, Academic Press, 1970.

#### ДИНАМИЧЕСКИЙ ПЬЕЗОМОДУЛЬ КЕРАМИКИ ЦТС-19

Н. П. Хохлов, В. Н. Минеев, А. Г. Иванов,  
В. И. Лучинин

(Москва)

Пьезокерамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) широко используется в экспериментах с ударными трубами в качестве чувствительного элемента датчиков давления [1—4]. В этих экспериментах реализуются давления до 10 МПа с характерными временами воздействия давления до 100 мкс. Единого метода тарировки таких датчиков давления нет. В работе [2] использовалась статическая тарировка, в [4] пьезодатчик тарировался по среднему уровню давления в продуктах детонации. В [1] пьезомодуль керамики  $d_{33}$  определялся путем сопоставления амплитуды электрического

сигнала датчика давлению в ударной волне, рассчитанному по кинематическим параметрам волны. Все это указывает на настоятельную необходимость выяснения возможной зависимости  $d_{33}$  от времени нарастания и амплитуды воздействующего импульса. Некоторые данные о зависимости величины  $d_{33}$  от времени нарастания импульса давления для пьезокерамики PZT 52/48 приведены в [5].

В настоящей работе пьезомодуль керамики ЦТС-19 определялся методом сравнения электрических сигналов с кварцевым и керамическим датчиков давления, находящихся в одинаковых условиях. Диапазон изменения давлений составлял  $0,3 \div 48$  МПа, время нарастания давления  $t_1$  изменялось от 0,32 до 25000 мкс. Использование кварцевого датчика в качестве эталонного прибора основывается на экспериментально установленном факте [6], что он, по крайней мере в области интервалов времен воздействия больших 0,01 мкс, является безынерционным прибором. Пьезомодуль  $x$ -среза кварца в исследуемой области давлений составляет величину  $K = 2,04 \cdot 10^{-10}$  Кл/(МПа·см<sup>2</sup>) [6].

В работе использовались четыре типа нагружающих устройств, характеристики которых приведены в таблице. Элементы экспериментальной сборки (рис. 1) крепились токопроводящим клеем на лаковой основе с включением мелкодисперсного серебра, кроме устройства 3, где применялся синтетический клей. Выводы с торцевых поверхностей пьезоэлементов выполнялись из медной фольги толщиной 0,002 см. Чистота обработки поверхностей экрана, датчиков и согласующих стержней не хуже  $\nabla 10$ . Кварцевые и пьезокерамические датчики имели форму диска. Размеры кварца, пьезокерамики и элементов измерительных устройств приведены в таблице. Использовались образцы керамики ЦТС-19 из одной партии.

<sup>1</sup> Время нарастания давления определялось на уровне  $0,1 \div 0,9$  амплитудного значения электрического сигнала с кварцевого датчика.

Способ нагружения	Материал экрана	Ко-лич. опы-тов	Параметры импульса нагружения		Толщина экрана, см	Толщина кварца, см	Диаметр кварца, см	Толщина пьезо-керамики, см	Диаметр пьезо-керамики, см	Материал со-гласующего стержня		Длина согласую-щего стержня, см	Время нарастания сигнала с пьезо-керамики на уровне $0,1 \div 0,9$ , мкс	
			давление в экране, МПа	время нарастания давления на уровне $0,1 \div 0,9$ , мкс						длительность импульса, мкс	Кварц			ЦТС-19
ОКГ ГОС 300 [7]	Д16	15	$0,3 \div 5,3$	$1,60 \pm 0,18$	0,1	0,05	1,0	0,05	1,1	Д16	Д16	4,7	$1,6 \pm 0,2$	
Взрывное устрой-ство	Железо «армко»	15	36	$0,32 \pm 0,12$	12	$\frac{0,1}{0,05}$	1,0	0,05	$\frac{1,0}{0,6}$	Д16	Cd	2,5	$0,5 \pm 0,1$	
														Копер
Гидравлический пресс	Кварц	10	15,0	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$0,12 \cdot 10^6$	0,1	1,0	0,1	1,0	1,0	—	—	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^3$	
		10	14,1	$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$0,12 \cdot 10^6$									$(6,1 \pm 0,8) \cdot 10^3$
		10	13,9	$(25 \pm 2) \cdot 10^3$	$0,17 \cdot 10^6$									

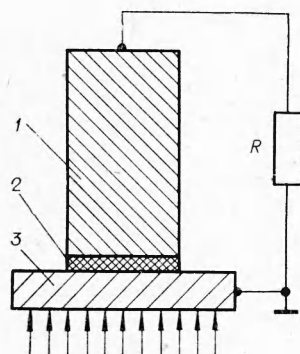


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента;  $R=1$  МОм — входное сопротивление осциллографа; стрелками показано направление действия давления.

1 — согласующий стержень; 2 — образец кварца или керамики ЦТС-19; 3 — экран нагружающего устройства.

Параметры нагружающего импульса в экранах определялись кварцевым датчиком давления, работавшим в потенциометрическом режиме. Кварцевые и керамические датчики ориентировались так, что регистрируемый сигнал имел положительную полярность. Типичные осциллограммы опытов приведены на рис. 2. Периоды собственных

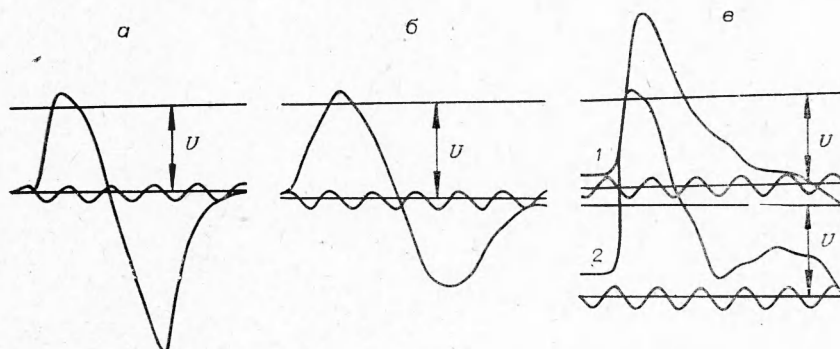


Рис. 2. Типичные осциллограммы опытов. Площадь датчиков  $0,786 \text{ см}^2$ , толщина  $0,1 \text{ см}$ .

а) копер, высота падения ударника  $4 \text{ см}$ , частота меток времени  $10 \text{ кГц}$ , кварц, калибровочное напряжение  $U=20 \text{ В}$ ; б) то же, керамика ЦТС-19,  $U=80 \text{ В}$ ; в) взрывное устройство, частота меток времени  $1 \text{ МГц}$ ; 1 — керамика ЦТС-19,  $U=159 \text{ В}$ , 2 — кварц,  $U=8 \text{ В}$ .

продольных колебаний используемых кварцевых и пьезокерамических датчиков (для максимальной толщины  $0,1 \text{ см}$ ) составляют  $\sim 0,4$  и  $0,6 \text{ мкс}$  соответственно.

Анализ осциллограмм показывает, что записи с кварцевого и пьезокерамического датчиков хорошо воспроизводятся, имеют колоколообразную форму и длительность больше, чем половина периода собственных

продольных колебаний пьезоэлементов. При этом амплитуда собственных колебаний меньше регистрируемого уровня сигнала. Время нарастания сигнала в пьезокерамике  $t_2$  в большинстве случаев превышает значение  $t_1$  (в таблице эти величины приведены с довери-

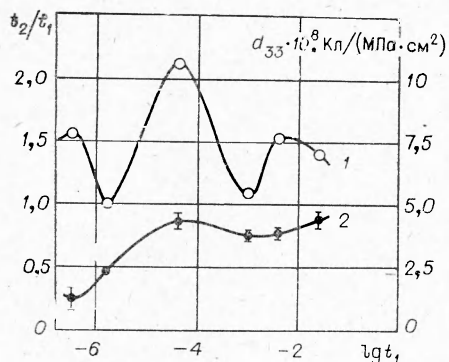


Рис. 3. Зависимость отношения  $t_2/t_1$  (1) и динамического пьезомодуля керамики ЦТС-19 (2) от времени нарастания давления ( $t_1$  в секундах).

тельными интервалами, соответствующими вероятности 0,95), что указывает на инерционность пьезоэлектрических свойств керамики ЦТС-19.

Зависимости величины  $d_{33}$  и отношения  $t_2/t_1$  от времени нарастания давления  $t_1$  приведены на рис. 3. В точках измерения показаны доверительные интервалы для величины  $d_{33}$  при вероятности 0,95. Здесь просматривается несколько экстремумов, которые свидетельствуют о том, что в исследуемом диапазоне давлений и времен нарастания давления в пьезокерамике ЦТС-19 проходит ряд релаксационных процессов. Время релаксации наиболее выраженного из этих процессов составляет  $\sim 40$  мкс. При  $t_1=41$  мкс  $d_{33}=4,3 \cdot 10^{-8}$  Кл/(МПа·см<sup>2</sup>), а  $t_2/t_1$  достигает максимальной величины, равной 2,16.

*Поступила в редакцию  
10/VI 1977*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Зайцев. ПТЭ, 1958, 6, 97.
2. Рэгланд, Куллен. Приборы для научных исследований, 1967, 6, 18.
3. Джонс, Власес. Приборы для научных исследований, 1967, 8, 30.
4. М. Е. Топчийн. ПМТФ, 1962, 4, 94.
5. D. Berlincourt, H. H. Kueger. J. Appl. Phys., 1959, 30, 1804.
6. R. A. Graham, F. W. Neilson, W. B. Benedick. J. Appl. Phys., 1965, 36, 1775.
7. Н. П. Хохлов, В. Н. Минеев, А. Г. Иванов.— В сб.: Доклады I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1974.