

стях $p_{\phi}(R)$ в направлении под углом 45° к оси ox и наличие максимума на кривой отказов объясняются влиянием гидродинамических потерь, связанных с расходимостью волны.

Поступила в редакцию 2/IX 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Канель, А. Н. Дремин. ФГВ, 1977, 13, 1.
2. J. Wackerle, J. Johnson, P. Halleck. Proc. 6-th Symp. (Intern.) on Detonation. ACR-221. Arlington, Virginia, 1976.
3. J. Wackerle, R. Rabie, M. Ginsberg e. a. Symp. HDP. Paris, 1978.
4. В. С. Трофимов, Г. П. Трофимова. ФГВ, 1980, 16, 2.
5. M. Cowperthwaite, J. Rosenberg. Proc. 6-th Symp. (Intern.) on Detonation. ACR-221. Arlington, Virginia, 1976.
6. P. Chen, J. Kennedy. Ibid.
7. R. Chéret, G. Verdès. Proc. 5-th Symp. (Intern.) on Detonation. ACR-184, Pasadena, California, 1970.
8. А. А. Воробьев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногловка, 1980.
9. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, В. Д. Глузман. ФГВ, 1972, 8, 1.
10. С. А. Бордзиловский, В. Ф. Лобанов, С. М. Караханов. ФГВ, 1983, 19, 4.
11. F. Bonthoux, P. Deneuille, Y. de Longueville. Proc. 7-th Symp. (Intern.) on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981.
12. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ. Деп. № 477 — 74.
13. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
14. В. С. Трофимов. Докт. дис. Черногловка, 1982.
15. LLNL Explosives Handbook. Lawrence Livermore Laboratory, California, UCRL-52997, 1981.
16. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, И. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53, 6.
17. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА КАК РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ УВ

Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов
(Москва)

В [1, 2] оценку эффективности сегнетоэлектрика (СЭ) предлагается проводить по удельной энергии

$$W = P^2 (2\epsilon_0 \epsilon)^{-1}, \quad (1)$$

где P — остаточная (спонтанная) поляризация СЭ; ϵ и ϵ_0 — диэлектрические характеристики

СЭ	P , мкКл/см ²	ϵ	$E_{\text{пр}}^{\text{ст}}$, кВ/мм	W , Дж/см ³	E_{max} , кВ/мм	p , ГПа	ΔP , мкКл/см ²	i_0 , А/см	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм
ЦТС-19 [3]	26	1600	3	2,5	19	5	25	10,2	4
						10	26	10,7	1,7
						20	26	10,7	0,5
ПКР-1 [4]	42	700	6	14,2	68	5	31	14,7	3,6
						10	36	17,3	2,5
						20	42	20,0	1,4
ПКР-7М [4]	28	4500	5	0,96	7	5	16	7,5	2,3
						10	23	10,8	1,6
						20	28	13,2	0,9
С1 [4]	35	330	6	21	120	2	34	14,4	5,5
						5	35	16	4
						10	35	16	1,2

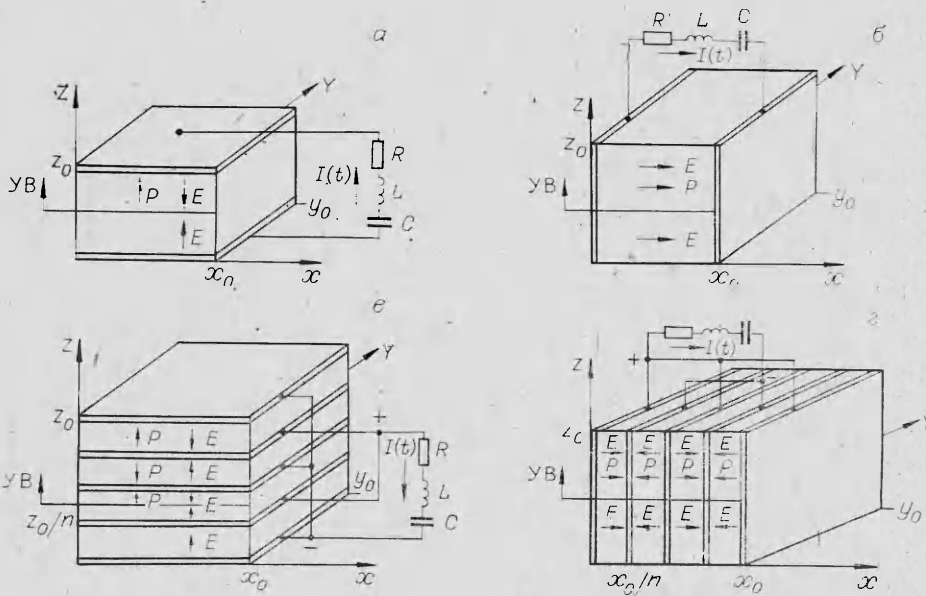


Рис. 1. Схемы взрывного преобразователя энергии (фронт УВ нагружает i -й элемент СЭ (а), одновременно все элементы (с)).
а, в) аксиальный; б, д) поперечный; L, R, C — элементы внешней нагрузки.

ческие проницаемости СЭ и вакуума. Однако если на обкладках конденсатора, содержащего СЭ, при нагружении его ударной волной (УВ) выделяется весь заряд P , то генерируемое электрическое поле в объеме СЭ будет максимальным

$$E_{\max} = P(\epsilon_0 \epsilon)^{-1}. \quad (2)$$

Как видно из данных таблицы, величина E_{\max} для всех исследованных составов сегнетоэлектрической пьезокерамики превосходит статическую электрическую прочность $E_{\text{пр}}^{\text{ст}}$. Выражения (1) и (2) записаны и обсуждены при анализе механизма преобразования энергии УВ [5] и особенностей развития пробоя в ударно-сжатом СЭ [6].

На рис. 1 показаны одно- (а, б) и многоэлементный (с, д) аксиальный и поперечный взрывные преобразователи энергии (ВПЭ). В развитии [5, 6] следует все СЭ разделить на две группы материалов (далеко не равноценные по их числу) по признаку:

теристики СЭ

j_0 , МВт/см ²	w_0 , Дж/см ³	$\frac{\tau}{T}$, %
0,4	1,0	23
0,2	0,5	10
0,05	0,1	3
0,5	1,1	7
0,4	0,9	4
0,3	0,6	2
0,2	0,4	57
0,2	0,4	28
0,1	0,2	13
0,8	2,0	5
0,6	1,4	3
0,2	0,4	1

$$E_{\max} \leq E_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad P \leq E_{\text{пр}} \epsilon_0 \epsilon,$$

$E_{\text{пр}}$ — динамическая электрическая прочность ударно-сжатого СЭ. В аксиальном ВПЭ могут использоваться СЭ только первой группы ($P < E_{\text{пр}} \epsilon_0 \epsilon$), в поперечном — материалы обеих групп¹. В этой ситуации использование (1) для оценки эффективности СЭ оказывается весьма ограниченным, так как подавляющее их большинство относится ко второй группе.

Анализ работ [7, 8] показывает, что:

— за счет выбора СЭ и интенсивности УВ в нем можно исключить из рассмотрения явления, связанные с инерционностью процесса деполяризации СЭ и УВ (с кинетикой доменных процессов);

¹ Напомним, что в поперечном ВПЭ возможно регулирование электрического поля.

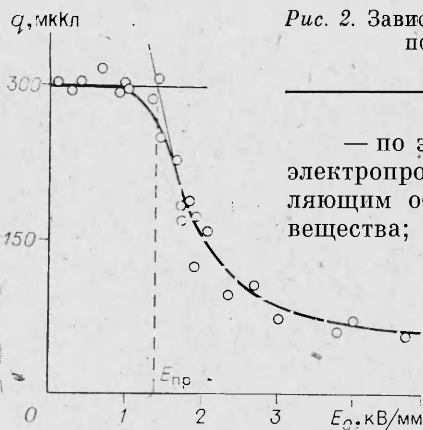


Рис. 2. Зависимость генерируемого заряда от напряженности поля в образцах ПКР-1 при $p = 20$ ГПа.

— по этой же причине пренебрегаем процессами электропроводности за и перед фронтом УВ, разделяющим образец СЭ на зоны сжатого и несжатого вещества;

— без ущерба для общности рассуждений можно не учитывать величину сжатия СЭ в УВ, которая в практических случаях не превышает 5%;

— для характеристики несжатой зоны СЭ используем уравнение связи в линеаризованном виде $D = \epsilon_0 \epsilon E + P$;

— для оценок в первом приближении считаем, что диэлектрическая проницаемость на фронте УВ не изменяется.

Работа всех ВПЭ, показанных на рис. 1, в интервале $(0, T)$ описывается единым дифференциальным уравнением

$$L\dot{I} + RI + (1/C + 1/C_0)I = 1/C_0 \cdot I_0, \quad (3)$$

где I_0 и C_0 — ток деполяризации и емкость одного элемента или блока элементов СЭ; $T = z_0/u$ — время движения УВ по элементу или блоку элементов; u — скорость УВ в СЭ.

Для аксиального одно- и многоэлементного ВПЭ

$$I_0 = \Delta Pu \cdot x_0 y_0 z_0^{-1}, \quad C_0 = \epsilon_0 \epsilon \cdot x_0 y_0 z_0^{-1};$$

$$I_0 = n \cdot \Delta Pu \cdot x_0 y_0 z_0^{-1}, \quad C_0 = n^2 \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot x_0 y_0 z_0^{-1}$$

соответственно. Для поперечного ВПЭ

$$I_0 = \Delta Pu \cdot y_0, \quad C_0 = \epsilon_0 \epsilon \cdot y_0 z_0^2 x_0^{-1};$$

$$I_0 = n \cdot \Delta Pu \cdot y_0, \quad C_0 = n^2 \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot y_0 z_0^2 x_0^{-1}.$$

В зависимости от вида ВПЭ, от числа входящих в него элементов СЭ (n) изменяются коэффициенты I_0 и C_0 в (3). Во всех выражениях I_0 есть произведение ΔPu , где ΔP — скачок поляризации на фронте УВ, который является функцией давления p . Это произведение условимся называть удельным током деполяризации, получаемым с единицы длины сечения электрода на элементе СЭ $i_0 = \Delta Pu$, и в дальнейшем используем его в качестве критерия оценки эффективности СЭ.

Решение (3) при нулевых начальных условиях для случая омической нагрузки R дает

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 (1 - e^{-t/\tau}), \\ V(t) &= V_0 (1 - e^{-t/\tau}), \end{aligned} \quad (4)$$

$\tau = RC_0$; $V_0 = RI_0$. По измеренной в опыте величине I_0 легко находятся $i_0 = I_0 y_0^{-1}$ и $\Delta P = I_0 (y_0 u)^{-1}$. Очевидно, что ограничение, накладываемое на P в первой группе материалов СЭ, сказывается также на i_0 : $i_0 < \epsilon_0 \epsilon E_{пр} u$.

Другими, дополнительными критериями служат:

— удельная электрическая мощность с единицы площади фронта УВ в СЭ $j_0 = I_0 y_0^{-1} E_{пр}$;

— удельная электрическая энергия с единицы объема ударно-сжатого СЭ, вырабатываемая УВ, $w_0 = I_0 (y_0 u)^{-1} E_{пр}$. Величина $E_{пр}$ находится графически (рис. 2). В серии экспериментов измеряется величина заряда

$q = \int_0^T I(t) dt$, перетекшего в цепи ВПЭ за время T при различной на-

пряженности поля $E_0 = V_0 x_0^{-1}$ в объеме СЭ. Последняя, как видно из (4), пропорциональна R .

Для оценки характерного времени установления тока в активной нагрузке поперечного ВПЭ от $I=0$ до $I=I_0$ может быть записано соотношение

$$\tau/T = \epsilon_0 \epsilon E_{пр} / \Delta P.$$

В таблице приведены энергетические характеристики ряда сегнето-пьезокерамик (i_0 , j_0 , w_0), полученные по изложенной выше методике. Эти характеристики, в отличие от [1, 2], являются реальными, измеренными в эксперименте с ВПЭ. Поэтому они позволяют проводить достоверную оценку эффективности СЭ, однозначное сравнение СЭ между собой, выбор одного из них, максимально отвечающего требованиям разрабатываемого ВПЭ.

Отметим, что на ПКР-1 получено максимальное значение $i_0 = 20$ А/см ($p = 20$ ГПа), на С1 — максимальное значение $w_0 = 2$ Дж/см³ ($p = 2$ ГПа).

Поступила в редакцию 4/V 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Bauer, K. Vollrath. *Ferroelectrics*, 1976, 12, 153.
2. В. М. Ищук, Е. М. Морозов, П. М. Коваленко и др. Авт. св. № 791700. ОИПОТЗ, 1980, 48.
3. Материалы пьезокерамические. Технические условия. ГОСТ 13927-74.
4. Е. Г. Фесенко, А. Я. Данцигер, О. Н. Разумовская. Новые пьезокерамические материалы. Ростов, 1983.
5. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов. — В кн.: Детонация. Черноголовка, 1980.
6. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов. ФГВ, 1983, 20, 4, 96.
7. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Г. Я. Карпенко. ФГВ, 1978, 14, 4, 115.
8. Lee Davison, R. A. Graham. *Phys. Reports*, 1979, 55, 4, 255.

ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

С. П. Буравова
(Черноголовка)

В работе [1] рассмотрен процесс затухания ударных волн (УВ), образующихся при соударении сферической частицы радиуса R_0 с плоской мишенью. Математической моделью течения за УВ может служить течение в сверхзвуковом диффузоре, у которого площадь сечения отождествляется с поверхностью фронта УВ. Изменение площади поверхности фронта F во времени следует закону

$$F = \pi R_0^2 (2\tau + a\tau^2), \quad (1)$$

где $\tau = v_0 t / R_0$ — безразмерное время; v_0 — скорость удара частицы о мишень, направленная нормально к поверхности; t — время; $a = \frac{c_u}{v_0} \frac{c_0}{v_0 - 2}$

для частицы и $a = \left(\frac{c_0}{v_0} + 1 \right) \left(\frac{c_0}{v_0} - 1 \right)$ для мишени соответственно; c_0 — скорость звука в невозмущенном материале.

Для простоты рассмотрен случай, когда мишень и частица выполнены из одного материала. Показано, что процесс распространения УВ сопровождается быстрым затуханием их интенсивности. После того как волна прошла всю частицу и вышла на свободную поверхность, давление во фронте составляет менее 30% от начального. Быстрозатухающая вол-