

фора. Ударная волна создавалась зарядом ВВ (октоген, плотностью $1,81 \text{ г/см}^3$) размером $80 \times 120 \text{ мм}$. Исследуемая NO_2 находилась в тефлоновой ячейке. Для поддержания начальной температуры, близкой к нулю, использовали охлаждающую смесь (вода со льдом). В качестве измерительных электродов применяли платиновые проволочки диаметром $0,25 \text{ мм}$, расположенные перпендикулярно плоскости ударного фронта. Расстояние между электродами 5 мм . Переход от измеряемого в опыте сопротивления к проводимости осуществляли путем электролитического моделирования. По результатам трех опытов установлено, что при давлении ударной волны в тефлоне 29 ГПа проводимость NO_2 составляет $60 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Таким образом, двуокись азота может вызвать электропроводность продуктов детонации тетранитрометана.

Поступила в редакцию
21/VIII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. Докл. АН СССР, 1975, 221, 5.
2. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев. Докл. АН СССР, 1975, 225, 5.
3. А. Г. Антипенко, В. В. Якушев. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1977.
4. Л. И. Хмельницкий. Справочник по взрывчатым веществам. Ч. II. М., Военная Артиллерийская инженерная академия им. Ф. Э. Дзержинского, 1961.
5. В. В. Якушев, С. С. Пабаатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4.
6. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
7. А. Н. Дремин, С. Д. Савров. ФГВ, 1966, 2, 1.
8. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, отд. научн. фондов, № 477—74, Деп. от. 28.02.74.
9. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ЖФХ, 1971, 45, 1.
10. A. N. Drem in, V. V. Yakushev. Acta Astronautica, 1974, 1, 7/8.
11. Г. Реми. Курс неорганической химии. М., Мир, 1972.
12. S. D. Hamann, M. Linton. Trans. Faraday Soc., 1966, 62, 2234.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ В УСЛОВИЯХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ. II. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

*Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Т. В. Трищенко
(Москва)*

В [1] подробно рассмотрены методы вольтметра — амперметра и колебательного контура применительно к измерению электрофизических параметров сегнетоэлектриков, в частности пьезо-, сегнетоэлектрической керамики (ПК). Рассматривались случаи, когда образец ПК подвергался воздействию только ударной волны (УВ), только быстропеременного электрического поля (Е), комплекса УВ и Е. Все эти случаи реализуются во взрывных преобразователях энергии на основе ПК [2], для которых характерно, что ПК разбивается фронтом УВ на две зоны — сжатого и несжатого вещества.

Ниже излагаются первые результаты исследований ПК марок¹ ЦТС-19 и ПКР-1 в несжатой и сжатой зонах по методу вольтметра —

¹ Свойства ЦТС-19 и ПКР-1 см. в [1, 2]. Значения коэрцитивных полей ПК: $1,2 \div 1,6$ и $0,6 \div 1,2 \text{ кВ/мм}$ соответственно.

амперметра, дается их анализ и проводится обсуждение. На этой основе развиваются физические представления о поведении сегнетоэлектриков в ударных волнах и в сильных, предпробивных и пробивных полях, т. е. в некоторых экстремальных условиях, которые трудно получить обычными лабораторными способами. Развитие физических представлений помогает прогнозировать оптимальные режимы работы преобразователей энергии ударной волны.

Все детали измерительных устройств, кривых напряжения $V(t)$ и тока $I(t)$ на регистрируемых в экспериментах осциллограммах, процедуры обработки осциллограмм изложены в [1]. В этой части сохранены также все другие обозначения [1].

Экспериментальные результаты

Несжатая зона. Результаты обработки осциллограмм сведены в табл. 1 (моменты t_1 (начало переполаризации ПК), t_2 (ее завершение), t_3 (возникновение электрического пробоя) отсчитываются от момента подачи зондирующего импульса с генераторной таблетки на исследуемые образцы; dE/dt — крутизна нарастания зондирующего импульса). Все исследуемые образцы ПК в виде диска имели диаметр 10 мм, толщина их изменялась в два раза — от 1,0 до 0,5 мм, толщина генераторной таблетки (при диаметре 30 мм) — от 3,0 до 5,5 мм. Различное сочетание по толщине образцов и таблетки позволяло варьировать крутизну нарастания поля зондирующего импульса. Генераторная таблетка сжималась ударной волной с интенсивностью 16 ГПа.

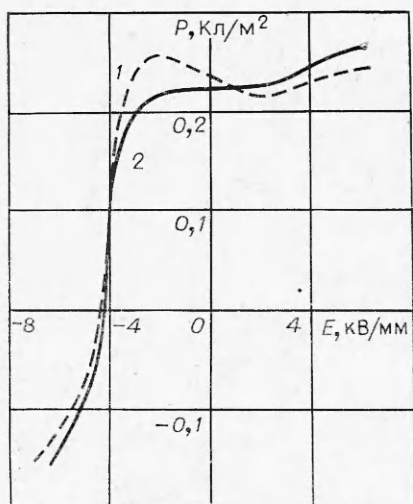
При одинаковой ориентации исследуемых образцов относительно направления распространения УВ регистрируемые в опыте осциллограммы токов $I(t)$ отличались хорошей воспроизводимостью. При различной их ориентации величина и форма $I(t)$ в цепях образцов существенно различались. Подобный результат может отражать протекание процесса

Таблица 1

Результаты обработки осциллограмм и расчетов образцов ПК в несжатой зоне

Марка ПК	Толщина исследуемого образца, мм	t_1 , мкс	t_2 , мкс	t_3 , мкс	Δt , мкс	dE/dt , $\frac{\text{В} \cdot 10^{-1}}{\text{мм} \cdot \text{мкс}}$	$E_{\text{пр'}}$, кВ/мм	Место пробоя*	q , Кл/м ²	$E_{D'}$, кВ/мм
ПКР-1	1	0,4	0,61	1,40	0,2	9,8	5,4	1	0,8	2,8
	1	0,63	1,10	1,90	0,47	5,6	7,4	1	0,7	3,0
	0,5	0,34	0,60	1,34	0,26	10,0	6,6	2	0,85	2,6
	0,5	0,36	0,58	1,33	0,22	12,5	7,8	3	0,78	3,6
	1	0,52	1,35	2,10	0,83	6,6	2,9	1	0,88	2,5
	1	0,47	1,35	1,95	0,88	5,6	5,4	1	0,68	2,3
	1	0,57	1,38	2,38	0,81	5,3	5,2	1	0,75	2,2
	1	0,50	—	1,35	0,83	7,1	3,2	1	—	2,7
	1	0,50	1,28	1,83	0,78	7,2	5,8	1	0,8	3,0
	1	0,32	0,52	1,05	0,20	10,5	4,2	1	0,72	2,5
	1	0,55	—	1,68	1,12	6,3	3,5	3	—	2,5
	ЦТС-19	1	0,45	0,45	1,20	0	12,5	6,2	2	0,35
1		0,57	0,57	1,47	0	8,6	6,6	1	0,32	3,8
1		0,55	0,83	1,45	0,28	6,7	7,8	1	0,35	4,5
0,5		0,22	0,31	0,50	0,09	19,8	8,8	1	0,36	3,3
0,5		0,2	0,26	0,43	0,06	18,5	7,8	1	0,32	3,3

* 1 — образец, находящийся в переполаризующем поле (положительная ориентация); 2 — образец, находящийся в поляризующем поле (отрицательная ориентация); 3 — генераторная таблетка.



переполаризации в том образце, в котором поле зондирующего импульса противоположно вектору остаточной поляризации P_0 , и процесса деполяризации в том образце, где направления векторов E и P_0 совпадали. Это позволяет построить зависимость электрического смещения D и поляризации P в зависимости от поля (в табл. 1 приведены результаты расчетов только для тех образцов, в которых имела место переполаризация). Часть динамической петли гистерезиса для ПКР-1, проходящая через I, II и III квадранты поля $D(P) - E$, приводилась в [1]. Здесь на рисунке показана зависимость $P(E)$ пьезокерамики ЦТС-19, для которой неожиданно оказалось необходимым изменить начальное значение диэлектрической

проницаемости, чтобы получить физически непротиворечивую зависимость. На рисунке показаны кривые для $\epsilon = 1600$ (1) (паспортное значение) и для $\epsilon = 800$ (2). Физически не противоречива здесь вторая кривая.

Сжатая зона. Образцы из ЦТС-19 и ПКР-1 толщиной 1 мм были или деполяризованы априори путем нагрева до температуры выше точки Кюри ($P_0 = 0$), или поляризованы до величины P_0 . Толщина генераторных таблеток ПКР-1 с $P_0 \approx 0,2$ Кл/м² составляла 3 или 5,5 мм. При деполяризации генераторной таблетки на ее электродах обеспечивалось выделение электрического заряда $\sim 1,4 \cdot 10^{-4}$ Кл. Зарегистрированная в опытах крутизна нарастания поля в исследуемых образцах составляла (10 ± 1) кВ/мм. Интервал времени между моментом ударного нагружения (начала деполяризации образцов) и моментом появления зондирующего импульса с генераторной таблетки равнялся во всех опытах ~ 1 мкс.

Реализованное в образцах ЦТС-19 давление составляло 1,5 ГПа, в образцах ПКР-1 — 1,6 ГПа. В табл. 2, 3 систематизированы результаты обработки осциллограмм опытов с образцами, в которых электрический пробой не наблюдался (непробившиеся образцы) и в которых пробой наблюдался (пробившиеся образцы). В табл. 2, 3 моменты t_1 (возникновение пробоя в одном из исследуемых образцов) и t_2 (спад тока до нуля в цепи другого исследуемого образца) отсчитываются от момента подачи зондирующего импульса; E_{\max} — поле, достигаемое в системе в момент t_1 ; I_{\max} — ток, протекающий через пробивающийся в опыте об-

Таблица 2

Результаты обработки осциллограмм и расчетов для непробившихся образцов ПК в сжатой зоне

Марка ПК	P_0 , Кл/м ²	t_1 , мкс	t_2 , мкс	E_{\max} , кВ/мм	\bar{I} , А	$Q_{\Sigma} \cdot 10^5$, Кл	$Q_1 \cdot 10^5$, Кл	$Q_2 \cdot 10^5$, Кл	\bar{R}_2 , Ом	$\bar{\rho}_2$, Ом·м	ϵ_2
ЦТС-19	0,225	0,73	1,4	7,26	15	0,619	0,9	-0,48	1010	79,5	1250
	0,225	0,78	1,0	7,08	17	0,581	1,1	-0,34	700	54,8	1200
	0,225	0,85	1,12	5,54	10	0,845	0,95	-0,47	890	70,1	1050
	0	0,66	1,23	6,39	12	0,853	0,70	-0,41	1100	89,6	1150
	0	0,49	0,69	5,47	15	1,35	0,61	-0,23	840	66,4	1350
ПКР-1	0,4	0,53	1,4	5,53	23	1,18	0,94	-0,85	940	73,8	1600
	0,4	0,32	1,4	4,38	26	1,24	0,72	-0,87	1100	87,4	2500
	0	0,42	1,32	3,22	17	1,30	0,42	-0,32	1200	94,8	1510
	0	0,70	1,05	2,40	5,5	0,915	0,35	-0,23	990	78,3	1700

Таблица 3

Результаты обработки осциллограмм и расчетов для пробившихся образцов ПК в сжатой зоне

Марка ПК	Образец*	P_0 , Кл/м ²	t_1 , мкс	t_2 , мкс	E_{\max}^{**} , кВ/мм	\bar{I} , А	I_{\max} , А	$p_{\text{деп}}$, Кл/м ²	Q_{Σ} , $\cdot 10^5$ Кл	$R_{\text{пр}}$, Ом	\bar{R}_K , Ом
ЦТС-19	1	0,225	0,73	1,4	7,26	12	267	0,209	0,619	20,3	11,4
	1	0,225	0,78	1,0	7,17	13	252	0,223	0,581	17,5	16,5
	1	0,225	0,75	0,71	6,66	12	325	0,197	0,69	8,75	8,75
	2	0,225	0,85	1,12	6,75	14	262	0,193	0,846	5,72	5,70
	1	0	0,66	1,23	6,43	12	358	0	0,853	13,0	12,7
	2	0	0,49	0,69	5,44	11	179	0	1,35	18,9	11,4
ПКР-1	1	0,4	0,53	1,4	5,53	40	353	0,41	1,18	7,62	7,60
	1	0,4	0,32	1,4	4,30	30	338	0,31	1,24	10,2	5,10
	1	0	0,42	1,32	3,32	18	233	0	1,30	13,6	7,60
	1	0	0,70	1,05	2,40	11	118	0	0,915	2,54	2,54

* 1, 2 — положительно и отрицательно ориентированный образец соответственно.

** Для пробившихся в опыте образцов $E_{\max} = E_{\text{пр}}$.

разец (в t_1); Q_{Σ} — суммарный заряд, перетекший за время измерения в цепях обоих образцов; Q_1 и $(-Q_2)$ — заряды, перетекшие в цепи непроводящегося образца за время $0 \div t_1$ и $t_1 \div t_2$; индекс 2 характеризует параметры ударно-сжатой ПК; $R_{\text{пр}}$ и R_K — сопротивления пробившегося образца в момент пробоя (t_1) и после — в интервале $t_1 \div t_2$.

Обсуждение результатов

Несжатая зона. Величина заряда переполаризации q близка к удвоенной величине остаточной поляризации соответствующей пьезокерамики (см. табл. 1). Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что при воздействии быстронарастающего электрического поля с указанными в таблицах параметрами процессы переполаризации в ПК, т. е. процессы переключения доменов успевают протекать полностью. Таким образом, выполненные построения динамических кривых $D(E)$ и $P(E)$ следует считать вполне обоснованными, а найденные значения динамического коэрцитивного поля E_D , при котором поляризация в ПК обращается в нуль, — отвечающими действительности. Последние составляют $2 \div 5$ для ПКР-1 и $3 \div 4$ кВ/мм для ЦТС-19 при скоростях нарастания переполаризующего поля зондирующего импульса $5 \div 14$ и $7 \div 20$ кВ \cdot мм⁻¹ \cdot мкс⁻¹ соответственно. Эти значения E_D в $2 \div 8$ раз превосходят значения коэрцитивных полей E_K для исследованных ПК. Величины E_D для ЦТС-19 и ПКР-1 при одной и той же скорости нарастания поля соотносятся так же, как значения статических коэрцитивных полей E_K (E_D и E_K у ЦТС-19 больше, чем у ПКР-1). Для ПКР-1 наблюдается некоторое возрастание E_D при увеличении скорости нарастания действующего поля, для ЦТС-19, такая зависимость не обнаружена.

Время Δt в табл. 1 характеризует время переключения 180-градусных доменов в кристаллитах ПК. Не останавливаясь на тонкостях этого процесса, заметим, что будучи более сегнетожесткой пьезокерамика ЦТС-19 характеризуется (см. табл. 1) более быстрым переключением доменов. Объясняется это, по-видимому, существенно большей пористостью этой керамики по сравнению с ПКР-1 (~ 10 и $\sim 1\%$ соответственно), что приводит к снижению внутренних напряжений в объеме ПК и, как результат, к облегчению 180-градусных поворотов как за счет прорастания зародышей доменов обратной ориентации, так и за счет бокового движения доменных стенок.

Тот факт, что для построения физически непротиворечивой зависимости $P(E)$ для пьезокерамики ЦТС-19 пришлось использовать заниженное по сравнению с паспортным значение диэлектрической проницаемости, возможно, свидетельствует о том, что при воздействии на эту ПК быстронарастающего электрического поля проявляется эффект дисперсии диэлектрической проницаемости, на котором сказываются временной (короткие времена воздействия) и полевой факторы (высокие электрические поля). Чтобы разделить их влияние, необходимы дополнительные эксперименты при существенно меньших полях.

Пробой, как видно из данных табл. 1, происходит с наибольшей вероятностью в образцах, где имела место переполяризация пьезокерамики. Причиной снижения электрической прочности образцов, испытывавших переполяризацию, по-видимому, является то, что в объеме пьезокерамики частично высвобождаются заряды, ранее связанные на границах переключаемых полей доменов. Попадая в электрическое поле, они усугубляют процесс развития электрического пробоя. Это обстоятельство существенно при выборе режима работы взрывного преобразователя энергии, поэтому при конструировании последних следует избегать аксиального способа нагружения ПК, когда перед фронтом УВ реализуется рассмотренная выше ситуация.

Сжатая зона. Анализируя полученные значения удельного объемного сопротивления $\bar{\rho}_2$ в табл. 2, можно видеть, что все они укладываются в диапазон $50 \div 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ независимо от номера исследуемого образца, его состояния (поляризованное или нет) и марки пьезокерамики.

В данной работе при расчете ρ_2 использовалось, по существу, первое приближение; удельное объемное сопротивление считалось зависящим от времени и от поля, которое в процессе эксперимента растет с течением времени. Отдельные детали проведенных экспериментов указывают на то, что ρ_2 зависит от обоих факторов, однако выявить эти зависимости в настоящий момент не представляется возможным.

Сравнение $\bar{\rho}_2$ с начальными значениями ρ при 20°C показывает, что они отличаются более чем на шесть порядков величины. На $4 \div 5$ порядков величины $\bar{\rho}_2$ меньше значений ρ , полученных в [3] в слабом переменном поле при гидростатическом сжатии ЦТС-19 и ПКР-1 до тех же давлений ($\sim 1,5 \text{ ГПа}$). Это обстоятельство может указывать на то, что измеренные здесь значения $\bar{\rho}_2$ описывают неравновесный процесс электропроводности, характерное время релаксации которого превышает время измерения. Нельзя исключить, что спустя это время релаксации $\bar{\rho}_2$ будет достигать значения удельного объемного сопротивления, измеренного при гидростатическом сжатии.

Развивая гипотезу о неравновесном характере электропроводности ПК в УВ, рассмотрим опять механизм воздействия УВ на ПК. Ударная волна, нарушая (разрушая) доменную конфигурацию в ПК по мере движения по образцу, создает на своем пути избыток свободных носителей, которые участвуют в процессе электропроводности, так как нарушенная (разрушенная) доменная конфигурация в ПК не восстанавливается, а освободившиеся заряды (фиксировавшие исходную доменную конфигурацию) не успевают «следить» за новым положением старых доменов или (и) фиксировать положение вновь образованных. Это резко отличается от случая ударно-волнового нагружения ПК от гидростатического, где свободные заряды «следят» за всеми изменениями доменной конфигурации, поскольку фактор времени при этом не ограничивается.

Рассмотренная ситуация имеет место в поляризованных и в неполяризованных образцах ПК, поэтому они отличаются между собой лишь упорядоченностью доменов, но не их средним количеством. Такая ситуация внешне схожа с рассмотренным выше случаем поведения ПК в предпробойном состоянии под действием электрического поля, когда оно

было переполяризуемым для данного образца. Это еще раз качественно подчеркивает выводы [4, 5], где отмечается общность физических процессов в ПК при воздействии на нее сильных электрических и сильных механических полей. Однако в целом этот вопрос для ударно-волновых экспериментов может быть решен только после проведения опытов в широком диапазоне давлений, где доменная конфигурация за фронтом УВ может восстанавливаться или нет, и в широком диапазоне электрических полей, где процессы переноса заряда будут иметь разную скорость.

Средние значения диэлектрической проницаемости за фронтом УВ составляют 1250 для ЦТС-19 и 1800 для ПКР-1. В первом случае диэлектрическая проницаемость упала, а во втором — выросла по отношению к своему исходному значению. Напомним, что в отсутствие УВ, при построении зависимости $P(E)$ использовались значения $\epsilon = 800$ для ЦТС-19 и паспортное значение $\epsilon = 700$ для ПКР-1 [1]. Для объяснения таких результатов экспериментальных данных сегодня совершенно недостаточно². Однако для расчетов энергетических характеристик взрывного преобразователя энергии полученные данные весьма полезны.

Анализ результатов табл. 3 показывает, что напряжение пробоя пьезокерамики ЦТС-19, которая деполяризуется ударной волной перед подачей на нее зондирующего импульса, составляет ~ 7 кВ/мм. Пробой аналогичных образцов ПК, предварительно деполяризованных, составляет ~ 6 кВ/мм. Для пьезокерамики ПКР-1 наблюдается аналогичная зависимость: величина поля равна ~ 5 и ~ 3 кВ/мм соответственно. Таким образом, электрическая прочность ударно-сжатой пьезокерамики ЦТС-19 выше, чем ПКР-1. Можно утверждать, что электрическая прочность поляризованной ПК заметно выше электрической прочности ПК, деполяризованной перед опытом.

При сравнении значений $R_{пр}$ и R_k (см. табл. 3) видно, что фиксируемый в опытах процесс электрического пробоя проходит все стадии и завершается формированием канала пробоя, сопротивление которого $R_{пр}$ достигает минимального значения в момент пробоя t_1 , когда ток в цепи образца достигает максимального значения. Важно отметить, что $\bar{R}_k \leq R_{пр}$ во всех случаях, т. е. сопротивление пробившегося в опыте образца сохраняется низким все время после пробоя, даже когда ток и напряжение на электродах образца стремятся к нулю. Естественно, что если бы наблюдаемый процесс резкого возрастания тока в окрестности t_1 представлял собой только результат резкого повышения проводимости ударно-сжатой ПК под действием электрического поля и не заканчивался бы образованием канала электрического пробоя, то при последующем уменьшении напряженности поля в ПК должно было бы наблюдаться восстановление электрической прочности образца и соответственно возрастание сопротивления образца, т. е. наблюдалось бы соотношение $R_k > R_{пр}$.

Поступила в редакцию
6/VIII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Т. В. Трищенко. ФГВ, 1980, 16, 1.
2. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Г. Я. Карпенко. ФГВ, 1978, 14, 4.
3. И. Н. Поляндов, В. И. Калинин и др. Вестн. Моск. ун-та. Химия, 1975, 16, 2, 224.
4. Г. А. Смоленский и др. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Л., Наука, 1971, с. 61; 317.
5. А. М. Завьялова и др. Электронная техника, 1969, 14, 1, 84.

² Недостаточно их и для проведения сопоставления ϵ_2 с результатами измерений ϵ при гидростатическом сжатии [3].