

УДК 537.9

**В.П. Комаров**, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., **А.Н. Пересадченко**, **А.Н. Бушная** (Научно-технологический центр «Реактивэлектрон» НАН Украины), **А.О. Хребтов**, канд. физ.-мат. наук (Институт магнетизма НАН Украины)

## ПОЛУЧЕНИЕ И ВЫБОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ЦТС С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЬЕЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

*Рассмотрены принципы работы пьезоэлектрических накопителей электрической энергии, обоснованы приоритеты проведенных исследований. Описана технология получения пьезокерамических материалов и изделий на их основе. Приведены методы исследований. Показан характер изменения электрофизических параметров в зависимости от состава исследуемого материала ЦТС (ЦТССт-2, ЦТССт-9, ЦТССтБС-2, ЦТССт-3, ЦТНС-3). Выявлены зависимости величины выходной мощности, развиваемой пьезокерамическими элементами от состава материала и закономерности поведения пьезоэлектрических констант.*

**Ключевые слова:** пьезогенератор, диэлектрический гистерезис, квазистатический режим, пьезомодуль, электрический заряд, выходная мощность.

Приоритет исследований и разработок, направленных на создание эффективных самовозобновляемых источников энергии, основанных на преобразовании механических воздействий в электрическую энергию при помощи пьезогенерирующих устройств, обусловлен уникальностью электрофизических и физико-механических свойств пьезокерамических материалов на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) со структурой перовскита (высокая надежность, малые массогабаритные показатели, высокая радиационная стойкость, термостойкость, стойкость к действию различных агрессивных сред).

Пьезогенератор – это преобразователь, который занимает достойное место в технике в качестве источника электрических зарядов, источника высокого напряжения для целей воспламенения, контроля изоляции, в качестве микромощных источников питания.

Для устройства, основной частью которого является пьезогенератор, достаточно знать две величины, характеризующие пьезоэлектрический материал. Это диэлектрическая проницаемость, поскольку от нее зависит емкость пьезоэлемента и пьезоэлектрический модуль. Пьезомодуль определяет величину электрического заряда на электродах пьезоэлемента при приложении к ним единицы силы. Пьезокерамика описывается тремя пьезомодулями, в зависимости от ориентации силы, прикладываемой относительно полярной оси пьезокерамического образца.

Принцип работы пьезоэлектрических накопителей электрической энергии заключается в следующем. При приложении электрического поля рабочий элемент поляризуется, за счет этого процесса накапливается электрическая энергия с плотностью  $P_r^2/2\varepsilon$ , где  $P_r$  – остаточная поляризация,  $\varepsilon$  – среднее значение диэлектрической проницаемости на протяжении процесса поляризации [1].

Наибольшего развития достигли исследования и разработки преобразователей энергии за счет влияния кратковременных механических нагрузок (удара) [2-4]. Для получения электрического импульса мощностью в сотни киловатт используются поляризованные пьезоэлектрические

керамические материалы. При импульсной механической нагрузке должны проявляться как пьезоэлектрические, так и сегнетоэлектрические свойства керамики, но за счет пьезоэлектрического эффекта можно достичь высвобождения на внешнюю нагрузку электрической энергии порядка  $2 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>, тогда как за счет располяризации пьезоэлектрика достигается энергия порядка  $10^6$  Дж/м<sup>3</sup> [5, 6].

Для проведения исследований в области разработки и получения пьезокерамических материалов для преобразователей механической энергии в электрическую методом твердофазного взаимодействия из оксидов – карбонатов (PbCO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SrCO<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>, ZnO, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, CdO) был получен ряд материалов системы ЦТС с различным характером свойств (ЦТСС-3, ЦТНС-3 – «сегнетожесткие», ЦТСТБС-2 – «средней степени сегнетожесткости», ЦТСС-2, ЦТСС-9 – «сегнетомягкие»). Из полученных материалов были изготовлены заготовки нескольких типоразмеров (Ø10×1 мм; Ø15×8 мм; Ø21×8 мм). Поскольку технология получения пьезокерамических элементов (ПКЭ) – это сложный многостадийный технологический процесс, где каждая последующая стадия производства непосредственно зависит от предыдущей, нами были интенсифицированы следующие операции изготовления элементов: спекание керамики исследуемых составов осуществляли в соответствии с экспериментально подобранным температурно-часовым режимом под слоем атмосферосоздающей засыпки. После чего образцы шлифовали до заданных размеров на шлифовально-доводочном станке с последующим отжигом для снятия механических напряжений. Металлизацию производили путем многократного нанесения и вжигания серебросодержащей пасты на поверхность образцов. Поляризацию проводили на воздухе в непрерывном постоянном поле при температуре, близкой к температуре Кюри.

В настоящей работе были применены следующие приборы и методы исследований. Для определения химического и фазового состава использовали химический и рентгенофазовый анализ (Дрон-2,0, Си  $\alpha$ -излучение). Дифференциальный термический анализ проводили на дериватографе Q-1500 (Венгрия). Определение гидростатической плотности и пористости спеченной керамики производили методом гидростатического взвешивания. Определение диэлектрических и пьезоэлектрических свойств осуществляли по методу «резонанса-антирезонанса» [7]. Запись петель диэлектрического гистерезиса осуществляли по Схеме Соьера-Тауэра в квазистатическом режиме ( $f=2 \cdot 10^{-2}$  Гц). Статическую нагрузку на исследуемые образцы (диски Ø10×1 мм) создавали с помощью пружинного динамометра. Механическую переменную нагрузку на ПКЭ создавали с помощью разработанной и созданной установки для тестирования ПКЭ в условиях предполагаемой эксплуатации.

Приведенные на рис. 1 гистограммы демонстрируют характер изменения электрофизических параметров (получены на стандартных образцах – дисках Ø10×1 мм) в зависимости от состава исследуемого материала ЦТС.

Пьезокерамика «сегнетомягких» составов характеризуется высокими значениями таких параметров, как: диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ ), пьезомодулей ( $d_{31}$ ,  $d_{33}$ ), коэффициента электромеханической связи ( $k_p$ ), повышенным значением диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и низкой механической добротностью ( $Q_M$ ). Для пьезокерамики «средней степени сегнетожесткости» и «сегнетожесткой» характерно противоположное сочетание свойств.

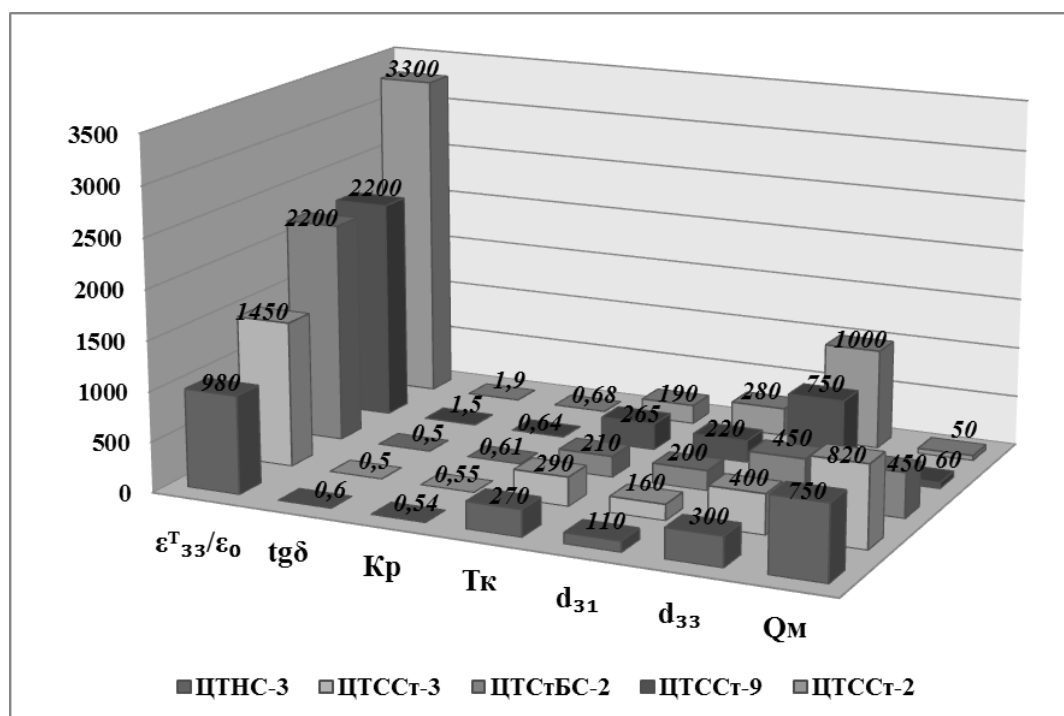


Рис. 1. Зависимости электрофизических параметров пьезокерамики от состава исследуемого материала ЦТС

Результаты измерений петель диэлектрического гистерезиса (рис. 2) показывают, что пьезокерамика, полученная из материалов «сегнетомягких» составов (ЦТССт-9, ЦТССт-2) обладает повышенными значениями остаточной поляризации и соответственно накопленной электрической энергии по отношению к составам «средней степени сегнетожесткости» (ЦТССтБС-2) и «сегнетожестким» (ЦТССт-3, ЦТНС-3) (табл. 1).

Таблица 1. Результаты исследований петель диэлектрического гистерезиса

Наименование показателей	Тип исследуемого материала				
	ЦТССт-9	ЦТССт-2	ЦТСТБС-2	ЦТССт-3	ЦТНС-3
остаточная поляризация $P_r$ , мкКл/см <sup>2</sup>	28,6	27,7	18,1	16,9	14,5
плотность накопленной энергии $W = P_r^2/2\epsilon$ , Дж/см <sup>3</sup>	0,205	0,135	0,080	0,100	0,105

Для оценки эффективности разработанных и исследуемых в данной работе материалов ЦТС изучено влияние статической и динамической нагрузок на ПКЭ разных составов.

Статическая нагрузка на образцы исследуемых составов была приложена вдоль их полярной оси с давлением от  $2,3 \cdot 10^2$  Н/см<sup>2</sup> до  $8,3 \cdot 10^3$  Н/см<sup>2</sup>. Термодинамический анализ состояния поляризованной керамики, нагруженной вдоль оси, показал, что минимум энергии системы соответствует перпендикулярной ориентации вектора спонтанной поляризации по отношению к направлению приложенной нагрузки.

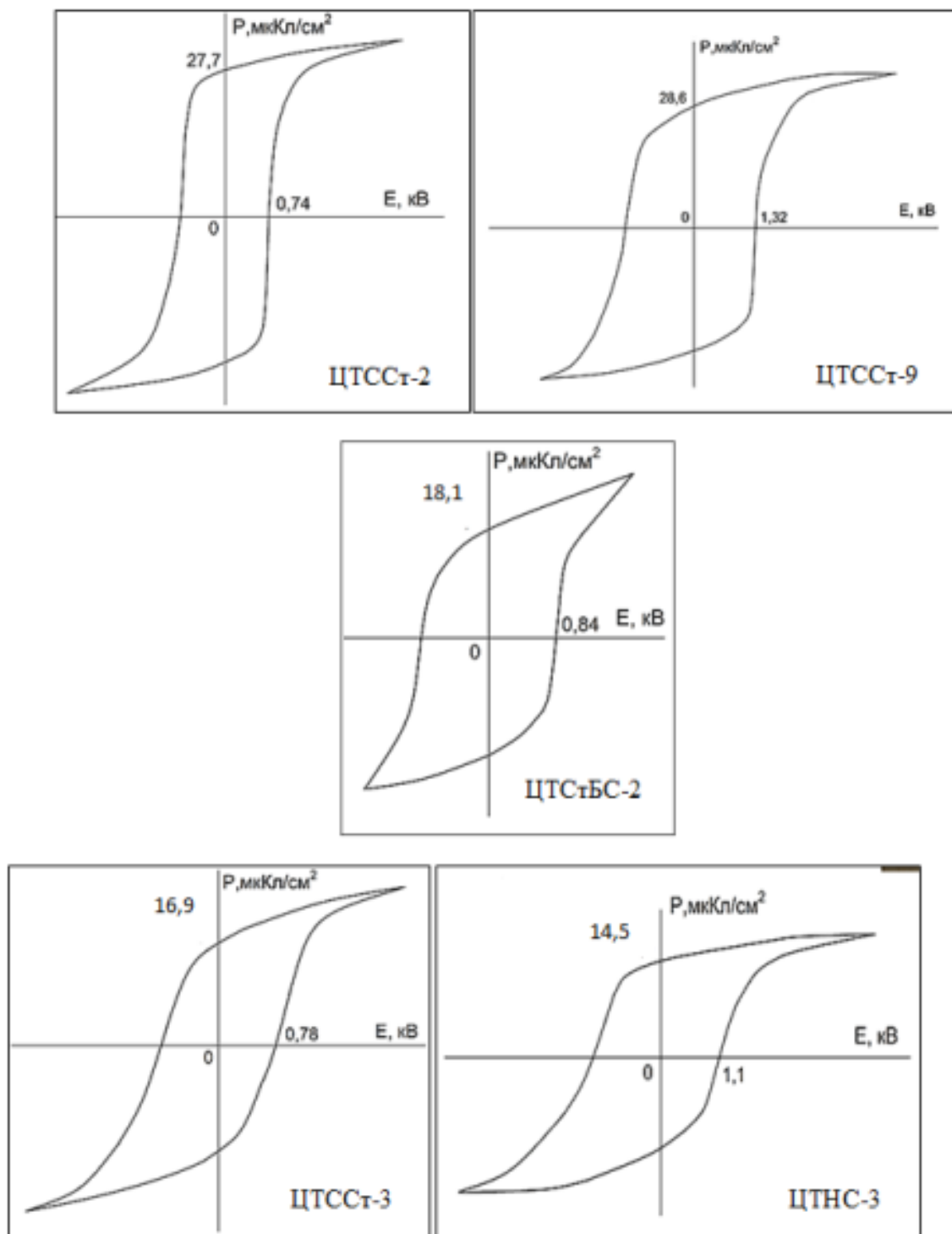
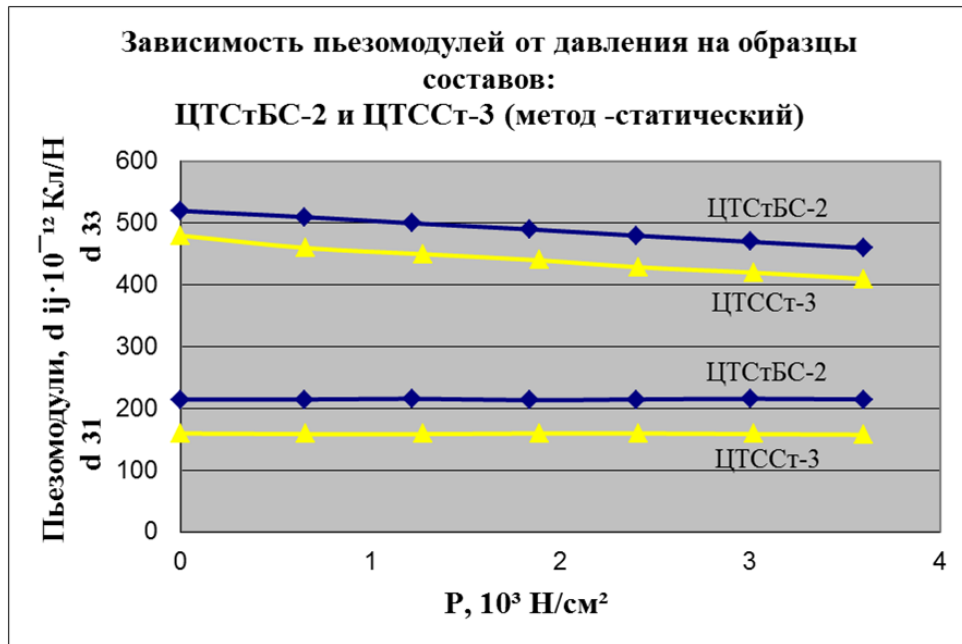


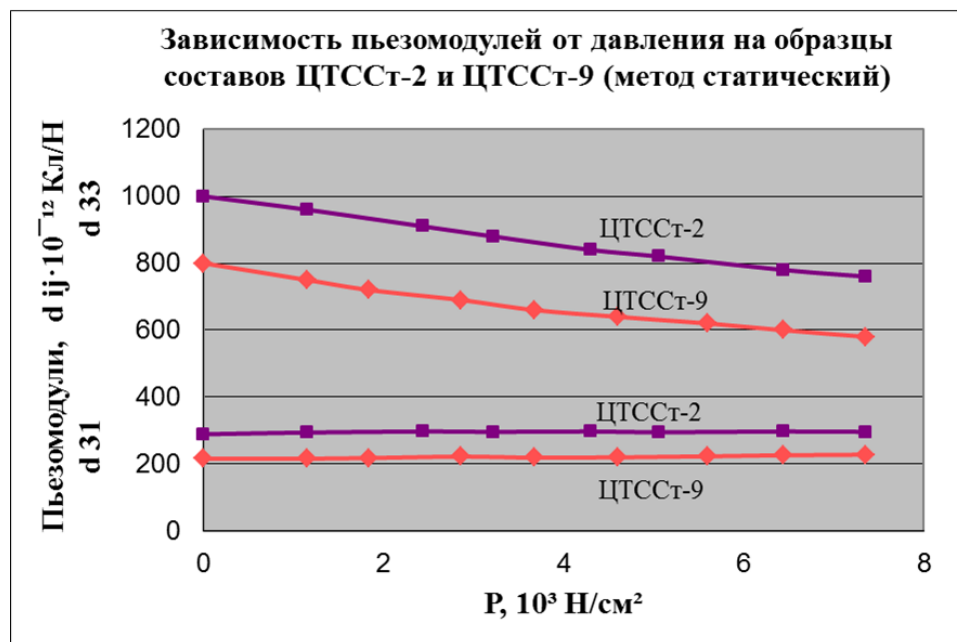
Рис. 2. Петли диэлектрического гистерезиса исследуемых пьезокерамических материалов

Поэтому в керамике, нагруженной вдоль полярной оси, реализуется большое количество  $90^\circ$  доменных поворотов, что должно приводить к ухудшению пьезоэлектрических свойств. Результаты изменения электрофизических параметров (пьезомодулей  $d_{31}$ ,  $d_{33}$ ) образцов пьезокерамики составов разной степени «сегнетожесткости» представлены на рис. 3, 4.



**Рис. 3.** Зависимости пьезомодулей от статического давления на образцы составов ЦТСтБС-2 и ЦТССТ-3

Ход зависимостей электрофизических параметров от давления для всех исследуемых составов пьезокерамики примерно одинаков. Характерной особенностью является относительное постоянство (незначительное изменение) величин диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и пьезомодуля ( $d_{31}$ ), однако наблюдается некоторое снижение значений пьезомодуля ( $d_{33}$ ). С увеличением давления на образцах составов: ЦТСтБС-2 и ЦТССТ-3 происходит снижение значений  $d_{33}$  на 12-14% и при достижении  $P = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$  происходит деформация образцов и их растрескивание.



**Рис. 4.** Зависимости пьезомодулей от статического давления на образцы составов ЦТССТ-2 и ЦТССТ-9

Для пьезокерамики составов: ЦТССт-2 и ЦТССт-9 снижение значений  $d_{33}$  на 12-13% наблюдается при этих же давлениях ( $P = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$ ), подъем статической нагрузки на образцы данных составов до  $8,3 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$  не приводит к механическим изменениям образцов, что характеризует «сегнетомягкую» керамику, как более устойчивую. По всей вероятности, возникающие локальные механические напряжения значительно выше в «сегнетожесткой» керамике из-за наличия метастабильных и неравновесных доменных конфигураций, что и приводит к разрушению образцов.

Разработанная и созданная установка для тестирования ПКЭ (рис. 5) позволяет за счет механических переменных напряжений периодического действия груза ( $P = 8-18 \text{ Н}$ ) на исследуемый пьезоэлемент снимать и фиксировать электрический заряд, генерируемый на обкладках исследуемого образца.

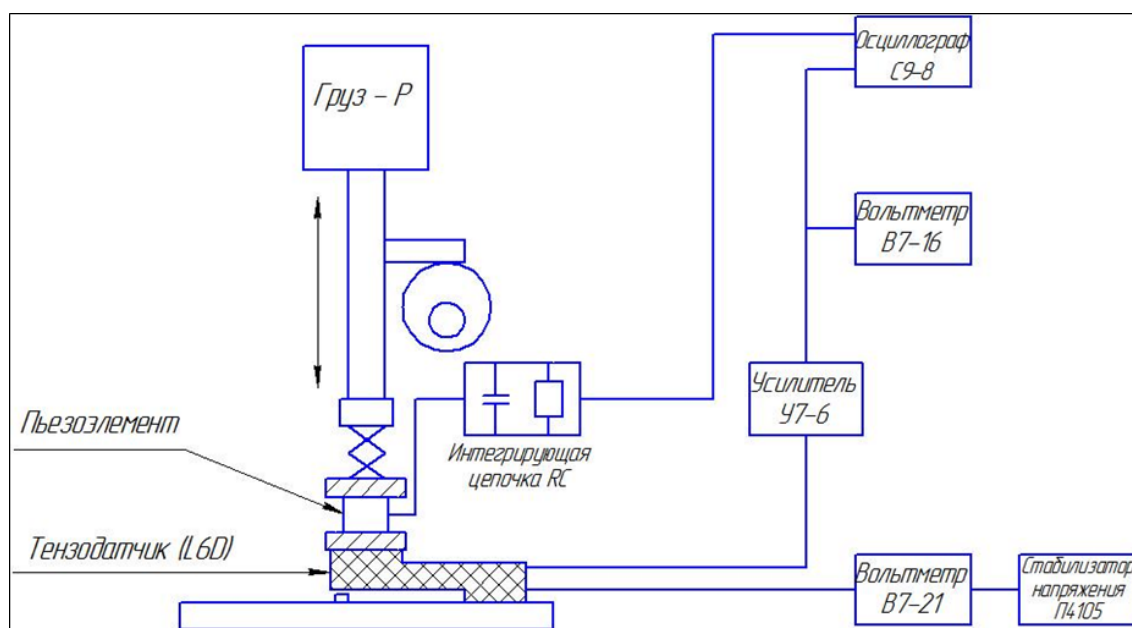


Рис.5. Схема установки для тестирования пьезокерамических элементов

Зная и фиксируя механическую нагрузку на ПКЭ в единицу времени, возникающий заряд регенерирующего электрического напряжения производили съём сигналов с соответствующего оборудования и вычисляли выходную мощность, развиваемую ПКЭ. Полученные результаты зависимостей выходной мощности ПКЭ от состава материала представлены в табл. 2.

Наблюдается устойчивая корреляция выходной мощности, развиваемой ПКЭ со значением пьезомодуля  $d_{33}$  (чем значение  $d_{33}$  выше, тем больше выходная мощность ПКЭ). Так, пьезоэлементы «сегнетожесткого» состава ЦТНС-3 ( $d_{33}=230 \cdot 10^{-12}$ , Кл/Н) развивают мощность  $N=(1,45-2,4) \cdot 10^{-10}$  Вт, а мощность, развиваемая пьезоэлементами «сегнетомягкого» материала ЦТССт-2 ( $d_{33}=700 \cdot 10^{-12}$ , Кл/Н) выше на порядок и составляет  $N=(2,10-3,00) \cdot 10^{-9}$  Вт. Таким образом, «сегнетомягкие» составы (ЦТССт-9, ЦТССт-2), которые обладают повышенными значениями остаточной поляризации и соответственно накопленной электрической энергией (табл.1) имеют максимальную выходную мощность, развиваемую ПКЭ.

**Таблица 2.** Зависимость выходной мощности, развиваемой ПКЭ от состава пьезокерамического материала (ПКМ)

Индекс ПКМ, № ПКЭ	Размер ПКЭ, площадь поверхности, см <sup>2</sup>		F <sub>min</sub> , Н	F <sub>max</sub> , Н	Частота f, Гц	Мощность N, Вт
	S=1,77					
	Ø, мм	h, мм				
ЦТНС-3 № 5	15,0	8,0	8,2	17,9	2,70	1,45·10 <sup>-10</sup>
№ 6	-//-	-//-	8,8	18,6	2,94	2,39·10 <sup>-10</sup>
№ 7	-//-	-//-	8,4	18,2	2,86	1,90·10 <sup>-10</sup>
ЦТССТ-3 № 15	15,0	8,0	8,4	18,6	2,94	4,70·10 <sup>-10</sup>
№ 16	-//-	-//-	8,6	17,7	-//-	4,07·10 <sup>-10</sup>
№ 17	-//-	-//-	8,2	18,1	2,90	5,10·10 <sup>-10</sup>
ЦТСТБС-2 № 4	15,0	8,0	7,8	18,2	2,86	8,36·10 <sup>-10</sup>
№ 5	-//-	-//-	9,4	18,4	2,94	9,66·10 <sup>-10</sup>
№ 6	-//-	-//-	8,6	18,1	2,89	9,10·10 <sup>-10</sup>
ЦТССТ-9 № 14	15,0	8,0	8,4	18,1	2,94	1,00·10 <sup>-9</sup>
№ 15	-//-	-//-	7,8	18,2	2,86	1,21·10 <sup>-9</sup>
№ 16	-//-	-//-	8,2	18,0	2,90	1,15·10 <sup>-9</sup>
ЦТССТ-2 № 11	15,0	8,0	8,0	17,7	2,86	3,00·10 <sup>-9</sup>
№ 12	-//-	-//-	8,2	17,3	-//-	2,10·10 <sup>-9</sup>
№ 13	-//-	-//-	8,4	17,5	2,88	2,52·10 <sup>-9</sup>

Выявлена зависимость величины выходной мощности, развиваемой ПКЭ от площади поверхности. Увеличение площади поверхности электродов в 2 раза (с S=1,77 см<sup>2</sup> до S=3,60 см<sup>2</sup>) приводит к повышению выходной мощности, развиваемой ПКЭ (табл.3).

**Таблица 3.** Сравнительные характеристики выходной мощности, развиваемой ПКЭ от площади поверхности

Индекс ПКМ, № ПКЭ	Размер ПКЭ		Площадь пов. ПКЭ, см <sup>2</sup>	Мощность N, Вт	Размер ПКЭ			Площадь пов. ПКЭ, см <sup>2</sup>	Мощность N, Вт
	Ø, мм	h, мм			№ ПКЭ	Ø, мм	h, мм		
ЦТНС-3 5	15,0	8,0	1,77	1,45·10 <sup>-10</sup>	1	21,4	7,6	3,59	5,10·10 <sup>-10</sup>
6	-//-	-//-	-//-	2,39·10 <sup>-10</sup>	3	-//-	-//-	-//-	4,33·10 <sup>-10</sup>
ЦТССТ-3 15	-//-	-//-	-//-	4,70·10 <sup>-10</sup>	1	21,2	7,7	3,53	5,90·10 <sup>-10</sup>
16	-//-	-//-	-//-	4,07·10 <sup>-10</sup>	3	-//-	-//-	-//-	7,18·10 <sup>-10</sup>
ЦТСТБС-2 4	-//-	-//-	-//-	8,36·10 <sup>-10</sup>	2	21,0	7,8	3,46	1,11·10 <sup>-9</sup>
5	-//-	-//-	-//-	9,66·10 <sup>-10</sup>	3	-//-	-//-	-//-	9,38·10 <sup>-10</sup>
ЦТССТ-9 14	-//-	-//-	-//-	1,00·10 <sup>-9</sup>	4	21,5	8,2	3,63	1,61·10 <sup>-9</sup>
15	-//-	-//-	-//-	1,21·10 <sup>-9</sup>	6	-//-	-//-	-//-	1,89·10 <sup>-9</sup>
ЦТССТ-2 11	-//-	-//-	-//-	3,00·10 <sup>-9</sup>	3	21,5	8,0	3,63	3,72·10 <sup>-9</sup>
12	-//-	-//-	-//-	2,10·10 <sup>-9</sup>	5	-//-	-//-	-//-	2,72·10 <sup>-9</sup>

При этом, на «сегнетожестких» составах (ЦТНС-3, ЦТССТ-3) она повышается на 50-80%, а на «сегнетомягких» составах (ЦТССТ-9, ЦТССТ-2)

повышение развиваемой мощности не превышает 20-40%, что объясняется различием в природе «прочности» «сегнетомягких» и «сегнетожестких» составов при изменении площади поверхности электродов исследуемой керамики. Так, диэлектрические потери у «сегнетомягкой» керамики в несколько раз выше ( $\text{tg}\delta = 1,8\text{--}2,0\%$ ), чем у «сегнетожесткой» ( $\text{tg}\delta = 0,50\text{--}0,60\%$ ), следовательно, мощность, развиваемая ПКЭ «сегнетомягкой» керамики в большей мере расходуется на их преодоление, чем в «сегнетожесткой».

Результаты исследования зависимостей выходной мощности ПКЭ различных составов материалов от статического давления (до  $1380 \text{ Н/см}^2$ ) представлены в табл. 4. Следует отметить, что полученная выходная мощность ПКЭ исследованных составов материалов не зависит от дополнительного статического давления в исследуемом интервале. Незначительные различия в величинах мощности, развиваемой ПКЭ, в пределах одного состава можно объяснить разной фиксацией минимальной и максимальной механической нагрузки на образец.

**Таблица 4.** Зависимость выходной мощности ПКЭ от статического давления

Индекс ПКМ, № ПКЭ	Размер ПКЭ		Выходная мощность ПКЭ N, Вт			
	Ø, мм	h, мм	Без статич. нагрузки	Статическое давление, Н/см <sup>2</sup>		
				230	690	1380
ЦТНС-3 № 5	15,0	8,0	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$3,31 \cdot 10^{-10}$	$3,58 \cdot 10^{-10}$	$3,50 \cdot 10^{-10}$
ЦТССТ-3 № 15	-//-	-//-	$4,70 \cdot 10^{-10}$	$6,84 \cdot 10^{-10}$	$8,05 \cdot 10^{-10}$	$7,12 \cdot 10^{-10}$
ЦТСтБС-2 № 4	-//-	-//-	$8,36 \cdot 10^{-10}$	$9,94 \cdot 10^{-10}$	$1,31 \cdot 10^{-9}$	$1,06 \cdot 10^{-9}$
ЦТССТ-9 № 14	-//-	-//-	$9,96 \cdot 10^{-10}$	$8,51 \cdot 10^{-10}$	$1,10 \cdot 10^{-9}$	$7,40 \cdot 10^{-10}$
ЦТССТ-2 № 11	-//-	-//-	$3,00 \cdot 10^{-9}$	$2,96 \cdot 10^{-9}$	$4,34 \cdot 10^{-9}$	$3,51 \cdot 10^{-9}$

Поскольку важной характеристикой работы пьезогенерирующих устройств при длительной эксплуатации является постоянство пьезоэлектрических констант используемой пьезокерамики, нами было исследовано изменение выходной мощности, развиваемой ПКЭ и пьезомодулей ( $d_{33}$ ) при непрерывной работе на установке в течение 5 часов (табл. 5).

**Таблица 5.** Результаты исследований выходной мощности, развиваемой ПКЭ и значений пьезомодулей ( $d_{33}$ ), измеренных во временном рабочем интервале

Индекс ПКМ	Размер ПКЭ		N, Вт		d <sub>33</sub> , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н		Относит. изменение пьезомодуля d <sub>33</sub> , %
	Ø, мм	h, мм	после 1 часа работы		после 5 часов работы		
ЦТНС-3	21,4	7,6	$1,94 \cdot 10^{-10}$	250	$2,74 \cdot 10^{-10}$	230	8,0
ЦТССТ-3	21,4	7,7	$4,32 \cdot 10^{-10}$	300	$3,55 \cdot 10^{-10}$	270	10,0
ЦТСтБС-2	21,0	7,8	$5,85 \cdot 10^{-10}$	420	$6,51 \cdot 10^{-10}$	360	14,3
ЦТССТ-9	21,5	8,2	$1,61 \cdot 10^{-10}$	500	$9,60 \cdot 10^{-10}$	450	10,0
ЦТССТ-2	21,5	8,0	$1,40 \cdot 10^{-9}$	640	$2,16 \cdot 10^{-9}$	630	1,6

Полученные данные показывают устойчивую корреляцию выходной мощности, развиваемой ПКЭ с величиной пьезомодуля  $d_{33}$ , измеренных через 1



и 5 часов после начала работы на всех исследуемых материалах (чем выше  $d_{33}$ , тем больше выходная мощность, развиваемая ПКЭ), что соответствует данным приведенным в таблице. Следует отметить важную особенность в изменении величины пьезомодуля  $d_{33}$  в процессе работы на установке. Так, на «сегнетожестких» составах (ЦТНС-3, ЦТССт-3) падение величины пьезомодуля составляет 8-10 %, на составе «средней жесткости» (ЦТСтБС-2) – 14 %, а на «сегнетомягком» составе (ЦТССт-2) всего – 1,6 %. Полученные нами результаты показывают стабильность пьезомодулей и соответственно пьезозарядов в процессе эксплуатации «сегнетомягкого» материала ЦТССт-2, который может быть предложен для применения в пьезогенерирующих устройствах.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить зависимости величины выходной мощности, развиваемой ПКЭ от состава материала при малых механических нагрузках и закономерности поведения пьезоэлектрических констант. Установлено, что ПКЭ «сегнетомягких» составов обладают не только повышенными значениями остаточной поляризации (накопленной электрической энергией), имеют максимальную выходную мощность, но и отличаются стабильностью пьезомодулей и соответственно пьезозарядов в процессе эксплуатации.

### Список использованной литературы

1. Bauer F. Ferroelectrics ceramics: Application to mechanical-electrical energy conversion under shock compression / F. Bauer, K. Vollrath // Ferroelectrics. — 1976. — Vol. 10, № 1-4. — P. 61–64.
2. Henry A. Sadano. Power Harvesting Using Piezoelectric Materials — <http://cap.ee.ic.ac.uk/pdm/97/2007>.
3. Kimberly Ann Cook-Chennault. Piezoelectric Energy Harvesting: A Green and clean alternative for sustained power production/ Ann Cook-Chennault Kimberly, Nithya Thambi, Mary Anne Bitetto Rutgers University, E. B. Hameyie Drexel University// Bulletin of Science, Technology & Society, 2008. — Vol. 28. — No 6. — P. 496–509.
4. Vullers R.J.M. Micropower energy harvesting / R.J.M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, R. Mertens// Solid-State Electronics 53. — 2009. — P. 684–693.
5. Bauer F., Vollrath K. Behavior of non-linear ferroelectric ceramics under shock waves/ F. Bauer, K. Vollrath // Ferroelectrics. — 1976. — Vol. 12, № 1-4. — P. 153–156.
6. Lysne P.C. Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramic: normal mode response of PZT 95/5 / P.C. Lysne, C.M. Percival // J.Appl.Phys. — 1975. — Vol. 46, № 4. — P. 1519–1526.
7. ОСТ 1104444-87. Отраслевой стандарт. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Введ. 01.01.88. — 140 с.

Надійшла до редколегії 07.12.2013.

### **В.П. Комаров, О.М. Пересадченко, Г.М. Бушна, А.О. Хребтов ОДЕРЖАННЯ ТА ВИБІР ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ ЦТС З МЕТОЮ ЗАСТОСУВАННЯ У П'ЄЗОГЕНЕРУЮЧИХ ПРИСТРОЯХ**

*Розглянуто принципи роботи п'єзоелектричних накопичувачів електричної енергії, обґрунтовано пріоритети проведених досліджень. Описано технологію одержання п'єзокерамічних матеріалів та виробів на їх основі. Наведено методи досліджень. Показано характер зміни електрофізичних параметрів у залежності від складу досліджуваного матеріалу ЦТС (ЦТССт-2, ЦТССт-9, ЦТСтБС-2, ЦТССт-3, ЦТНС-3). Виявлені залежності величини вихідної потужності, яку розвивають п'єзокерамічні елементи від складу матеріалу та закономірності поведінки п'єзоелектричних констант.*

**Ключові слова:** п'єзогенератор, діелектричний гістерезис, квазістатичний режим, п'єзомодуль, електричний заряд, вихідна потужність.

**V.P. Komarov, A.N. Peresadchenko, A.N. Bushnaya, A.O. Khrebtov THE PRODUCTION AND THE CHOICE OF THE FUNCTIONAL MATERIALS OF THE SYSTEM PZT WITH THE OBJECT OF APPLICATION IN THE PIEZEGENERATING SYSTEMS**

The concepts of electrical energy piezoelectric integrators are considered, the main purposes of researches are based. The technology of PZT piezoceramics materials production (method solid-phase interaction out of oxides-carbonates) and the products on their base (high-temperature sintering, grinding-finishing, annealing, metallization, polarization in the airspace) are described. The methods of researches are described.

The electrophysical parameters behavior depending on composition of the PZT materials researched is coincided (soft piezoelectric materials - PZT (two industrial models), middle piezoelectric materials – PZT (industrial model) and hard piezoelectric materials – PZT (two industrial models)). The dielectric-hysteresis characteristics of piezoceramics compositions analyzed are studied.

Behaviors of the piezoceramics elements (PCE) of the stored energy in the process of polarization under the effect of static and dynamic loads are studied. The power developed of piezoceramics elements under mechanical pulsating load on the samples was investigated using construct device.

PCE of soft piezoelectric materials PZT develop not only maximal power in the device for testing piezoceramics materials ( $N=2,5 \cdot 10^{-9}$  W) in comparison with PCE of others materials (middle piezoelectric materials and hard piezoelectric materials), but also offer the stability of piezoelectric modulus and proper piezocharges on-stream.

**Keywords:** piezogenerator, dielectric hysteresis, quasi-static regime, piezoelectric modulus, electrical charge, output power.

**Комаров Владимир Павлович** – канд.хим.наук, старший научный сотрудник, ГУ НТЦ «Реактивэлектрон» НАН Украины, Донецк. [Office.re@nas.gov.ua](mailto:Office.re@nas.gov.ua)

**Пересадченко Алексей Николаевич** – старший научный сотрудник, ГУ НТЦ «Реактивэлектрон» НАН Украины, Донецк. [Office.re@nas.gov.ua](mailto:Office.re@nas.gov.ua)

**Бушная Анна Николаевна** – ведущий инженер, ГУ НТЦ «Реактивэлектрон» НАН Украины, Донецк. [Office.re@nas.gov.ua](mailto:Office.re@nas.gov.ua)

**Хребтов Аркадий Олегович** – канд.физ.-мат.наук, ученый секретарь, Институт магнетизма НАН Украины, Киев. E-mail: [mezozavr@ukr.net](mailto:mezozavr@ukr.net)

УДК 547.521.68

**Н.В. Щebetовская**, канд. хим. наук (Донбасская национальная академия строительства и архитектуры)

**РАВНОВЕСНАЯ И НЕРАВНОВЕСНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ДИФЕНИЛА**

В работе методом циклического термического анализа исследованы процессы кристаллизации дифенила. Обнаружен переход от равновесной кристаллизации без переохлаждения к неравновесной со значительным переохлаждением в зависимости от термической предыстории расплава. Экспериментальные данные использованы для сравнительного анализа кинетических параметров кристаллизации при равновесной и неравновесной кристаллизации дифенила. Рассчитаны степени кристалличности, константы кристаллизации и показатели Аврами для двух типов кристаллизации, а также критические размеры зародышей и работа их образования. Проведен анализ энергии Гиббса  $G$  от температуры  $T$  для твердой и жидкой фаз.

**Ключевые слова:** дифенил, плавление, перегрев, кристаллизация, переохлаждение, термограммы, кинетические параметры кристаллизации, энергия Гиббса, критический зародыш, степень кристалличности.

При изучении кинетики кристаллизации целого ряда низкомолекулярных органических соединений (НМОС), таких как фенол, бензол, нафталин,