

Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 537.226.86

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-172-179

Л.А. Дыкина, А.А. Панич, А.В. Скрылёв, Ю.А. Проскорякова

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ТИТАНА

Данная статья посвящена твердым растворам на основе ЦТС как основы активных элементов для разовых импульсных источников энергии. В статье оценена генерирующая способность пьезокерамического материала на основе цирконата-титаната свинца с низким содержанием титана (Zr/Ti 0,94/0,06 + 1 % Nb_2O_5) при его ударном нагружении. В таких материалах фазовый переход, индуцированный давлением (одноосным, импульсным гидростатическим или ударной волной), происходит из полярной сегнетоэлектрической фазы в неполярную антисегнетоэлектрическую. Высвобождаемая энергия в этом случае на порядок выше, чем при пьезоэффекте. Мерой накопления электрического заряда является значение остаточной поляризации, пропорциональное электрической энергии, высвобождаемой при фазовом переходе. В ходе работы получены основные электрофизические параметры исследуемого материала: относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях, пьезомодуль d_{33} . Получен ряд численных значений остаточной поляризации исследуемого материала несколькими методами: термической деполяризации и ударным нагружением; рассчитана плотность накопленной энергии как отношение остаточной поляризации к двум абсолютным диэлектрическим проницаемостям. Проведены оценка генерирующей способности исследуемого материала и сравнительный анализ с промышленно выпускаемым пьезокерамическим материалом ЦТС-19. Установлено, что плотность накопленной энергии у исследуемого материала на два порядка выше, чем у ЦТС-19. Также стоит отметить, что индуцированный давлением фазовый переход из сегнетоэлектрической в антисегнетоэлектрическую фазу для материалов с низким содержанием титана происходит при значительно меньших давлениях, чем в материалах, находящихся вблизи морфотропной границы. Такое поведение обусловлено тем, что энергии состояний сегнетоэлектрической и антисегнетоэлектрической фаз отличаются незначительно, поэтому достаточно относительно небольшого внешнего воздействия (давления или электрического поля), чтобы нарушить существующую стабильность и перевести пьезокерамику из одного фазового состояния в другое. Этот факт оказывает положительное влияние на генерирующую способность элементов, изготовленных из исследуемого материала, так как при воздействии высокого давления происходит сильное снижение электрического сопротивления пьезокерамики, и значительная часть электрической энергии может рассеиваться в самом пьезоэлементе.

Пьезогенератор; остаточная поляризация; пьезомодуль; электрический заряд; ЦТС.

L.A. Dykina, A.A. Panich, A.V. Skrylev, Yu.A. Proskoryakova

**STUDY OF GENERATING CAPACITY OF PIEZOCERAMIC ELEMENTS
BASED ON LEAD ZIRCONATE-TITANATE WITH LOW TITANIUM
CONTENT**

This article is devoted to PZT-based solid solutions as the basis of active elements for single-use pulsed energy sources. The article evaluates the generating ability of a piezoceramic material based on lead zirconate-titanate with a low titanium content (Zr/Ti 0,94/0,06 + 1 % Nb₂O₅) under its shock loading. In such materials, the pressure-induced (uniaxial, pulsed hydrostatic, or shock wave) phase transition occurs from the polar ferroelectric phase to the non-polar antiferroelectric phase. The released energy in this case is an order of magnitude higher than with the piezoelectric effect. A measure of the accumulation of electrical charge is the value of the residual polarization, which is proportional to the electrical energy released during the phase transition. In the course of the work, the main electrophysical parameters of the material under study were obtained: relative dielectric constant, dielectric loss tangent in weak fields, piezoelectric charge constant d_{33} . A number of numerical values of the residual polarization of the material under study were obtained by several methods: thermal depolarization and shock loading; the accumulated energy density is calculated as the ratio of the residual polarization to two absolute dielectric constants. An assessment of the generating capacity of the material under study and a comparative analysis with the industrially produced piezoceramic material PZT-19 are carried out. It was found that the density of the accumulated energy of the material under study is two orders of magnitude higher than that of PZT-19. It is also worth noting that the pressure-induced phase transition from the ferroelectric to antiferroelectric phase for materials with a low titanium content occurs at much lower pressures than in materials located near the morphotropic boundary. This behavior is due to the fact that the energies of the states of the ferroelectric and antiferroelectric phases differ insignificantly; therefore, a relatively small external influence (pressure or electric field) is sufficient to violate the existing stability and transfer piezoceramics from one phase state to another. This fact has a positive effect on the generating ability of elements made of the material under study, since when exposed to high pressure, the electrical resistance of the piezoelectric ceramics decreases significantly, and a significant part of the electrical energy can be dissipated in the piezoelectric element itself.

Piezogenerator; remanent polarization; piezoelectric charge constant; electric charge; PZT.

Введение. В настоящее время проявляется большой интерес к разовым импульсным источникам питания [1]. Примером одного из них является сегнетоэлектрический генератор [2]. Сегнетоэлектрические генераторы, как правило, относительно недороги и состоят из небольшого пирозаряда и сегнетоэлектрического элемента. В качестве сегнетоэлектрического элемента традиционно используется пьезокерамика на основе ЦТС – $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$.

В таких устройствах преобразование механической энергии в электрическую происходит за счет пьезоэффекта или фазового перехода (ФП) из полярной сегнетоэлектрической фазы в неполярную антисегнетоэлектрическую ($\text{СЭ} \rightarrow \text{АСЭ}$) при воздействии импульсного гидростатического сжатия или ударной волны.

По результатам исследований [3,4], при пьезоэффекте высвобождаемая электрическая энергия составляет $2 \cdot 10^4 \cdot \text{Дж}/\text{м}^3$, а при фазовом переходе ФП $\text{СЭ} \rightarrow \text{АСЭ}$ она достигает $1 \cdot 10^6 \cdot \text{Дж}/\text{м}^3$ и более [5]. Мерой накопления электрического заряда в поляризованной пьезокерамике в отсутствии электрического поля является остаточная поляризация $P_{\text{ост}}$. Величина $P_{\text{ост}}$ зависит от химического состава пьезокерамики и технологии её изготовления, а также режимов поляризации. Чем выше $P_{\text{ост}}$, тем большую электрическую энергию может отдать пьезоэлемент во внешнюю электрическую нагрузку при волновом воздействии в результате вынужденного ФП $\text{СЭ} \rightarrow \text{АСЭ}$.

В литературе имеется целый ряд публикаций, посвящённых высвобождению электрической энергии поляризованной пьезоэлектрической керамикой на основе твёрдых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС) при фазовых переходах СЭ→АСЭ, индуцированных давлением [3–6]. Прикладываемое давление может быть гидростатическим, одноосным или ударно-волновым [7]. При воздействии высокого давления происходит сильное снижение электрического сопротивления пьезокерамики, и значительная часть электрической энергии теряется в самом пьезоэлементе. Исходя из этого, для высвобождения максимальной запасенной энергии, пьезокерамика должна обладать низким значением давления фазового перехода.

Низкое давление ФП СЭ→АСЭ обусловлено тем, что энергии состояний СЭ и АСЭ фаз отличаются незначительно, поэтому достаточно небольшого внешнего воздействия (давления или электрического поля), чтобы нарушить существующую стабильность и перевести пьезокерамику из одного фазового состояния в другое [8]. Таким образом, наиболее перспективными составами, имеющими низкие пороговые значения давлений вынужденных фазовых переходов, являются твёрдые растворы, находящиеся в СЭ состоянии и на фазовой диаграмме расположенные вблизи границы разделяющей СЭ и АСЭ состояния. Такой фазовый переход СЭ→АСЭ, например, имеет место в твёрдых растворах на основе ЦТС с малым содержанием титана.

Целью настоящей работы является изучение генерирующей способности пьезокерамических элементов на основе цирконата-титаната свинца с низким содержанием титана.

1. Методика эксперимента. В качестве модельного пьезокерамического материала был выбран промышленно выпускаемый пьезоматериал ЦТС-19 с соотношением Zr/Ti 0,53/0,47 [9]. Из выбранного материала были изготовлены образцы размером 6х6х3мм по обычной керамической технологии. Далее на большие поверхности образцов нанесены электроды путем вжигания серебряносодержащей пасты. Образцы поляризованы в жидкой среде (полисилоксановая жидкость) полем 1,5 кВ/мм при температуре 120°C в течение 20 минут с последующим охлаждением под полем.

Для изготовления пьезокерамических элементов на основе цирконата-титаната свинца с низким содержанием титана был изготовлен пьезоматериал с соотношением Zr/Ti 0,94/0,06 + 1% Nb_2O_5 [10–12], оксид ниобия вводили в систему в качестве стабилизирующей добавки.

Из полученного пьезоматериала по обычной керамической технологии изготовлены образцы 6х6х3мм. Нанесение электрода и поляризацию пьезоэлементов проводили аналогично образцам из пьезоматериала ЦТС-19.

На не поляризованных образцах была определена температура Кюри T_C . Величину T_C определяли, как температуру, при которой достигается максимальное значение величины диэлектрической проницаемости материала по величине измеряемой статической электрической ёмкости образца на частоте 1кГц.

На поляризованных образцах были исследованы основные электрофизические характеристики материалов. Относительная диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$), тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$), были измерены с помощью прецизионного измерителя импеданса Wayne Kerr Electronics WK 6510B. Пьезомодуль d_{33} был измерен в квазистатическом режиме на установке APC YE2730A. Для оценки остаточной поляризации поляризованных образцов использовался метод термической деполяризации [6] и метод ударного нагружения [13–17]. Плотность накапливаемой энергии была рассчитана по формуле

$$W = \frac{P_{\text{ост}}^2}{2\varepsilon},$$

где $P_{\text{ост}}$ – остаточная поляризация пьезокерамики, Кл/м², ε – средняя абсолютная диэлектрическая проницаемость в процессе деполяризации, Ф/м.

Для реализации метода термической деполяризации использована печь с автоматической регулировкой температуры SNOL 8,2/1100. Во время эксперимента образец помещался в стакан, наполненный мелкодисперсным кварцевым песком, в непосредственной близости с элементом располагалась хромель-алюмелевая термопара. Электроды пьезоэлемента соединялись с электрометрическим усилителем У5-11 подключённым к вольтметру В7-78/2 с подведённой термопарой. Данные с В7-78/2 регистрировались на ПК через интерфейс USB. Скорость нагрева составляла 3 °С/мин. Остаточная поляризация рассчитывалась как отношение интеграла экспериментально измеренного тока деполяризации к площади электрода:

$$P_r(T(t)) = \frac{1}{S_3} \int_0^t I(T(t)) \cdot dt,$$

где S_3 – площадь электрода, м²; I – ток деполяризации, А.

Величина остаточной поляризации, выделяемой образцом при его ударном воздействии, определялась на установке с измерительной схемой, приведенной на рисунке 1. В качестве нагрузки использовался конденсатор ёмкостью 10 мкФ. Напряжение на обкладках конденсатора регистрировалось на осциллографе Rigol MSO2302A-S в режиме записи.

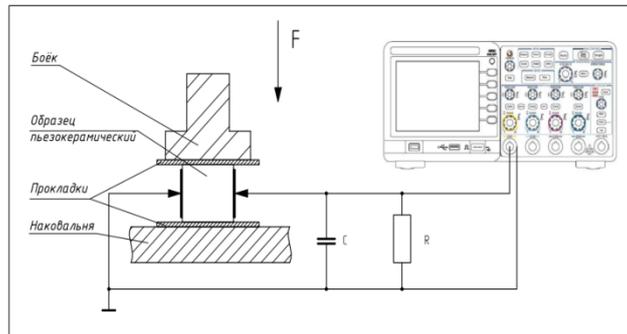


Рис. 1. Схема измерительная

Определяя напряжение U на выводах конденсатора и зная заряд q , величину остаточной поляризации рассчитывали по формуле:

$$P_r = U \cdot \frac{q}{S},$$

где P_r – остаточная поляризация пьезоэлектрического образца, Кл/м²;

S – площадь поверхности образца, подлежащая ударной нагрузке, м²;

U – напряжение на конденсаторе нагрузки, В;

q – величина заряда конденсатора нагрузки, Кл.

Результаты и обсуждения. В табл. 1 представлены результаты измерений относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$), тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), пьезомодуля d_{33} , остаточной поляризации $P_{\text{ост}}$, температуры Кюри T_C и плотности накопленной энергии W для промышленного материала ЦТС-19 и исследуемого состава.

Таблица 1

Основные электрофизические характеристики исследуемых образцов материалов

Материал	Zr/Ti	T_c , °C	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	tg δ	$d_{33} \cdot 10^{-12}$, Кл/Н	$\frac{P_{ост}^T}{см^2}$, мкКл	$\frac{P_{ост}^Y}{см^2}$, мкКл	W , Дж/см ³
ЦТС-19	0,53/0,47	290	1900	0,02	380	32	14	0,58
Исследуемый состав	0,94/0,06	220	195	0,02	163	35	21	12,77
Примечание: $P_{ост}^T$ – остаточная поляризация, полученная методом термической деполяризации; $P_{ост}^Y$ – остаточная поляризация, полученная методом ударного воздействия; W – плотность накопленной энергии рассчитана для ударного воздействия.								

Из формулы 1 следует, что максимальная электрическая энергия запасается в пьезоматериалах с высокой остаточной поляризацией и минимальным значением диэлектрической проницаемости.

Из табл. 1 видно, что пьезокерамический материал ЦТС-19 обладает достаточно высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости по сравнению с пьезоматериалом с низким содержанием титана (6 % моль). К тому же, несмотря на низкие значения пьезомодуля d_{33} , у исследуемого состава значения остаточной поляризации и плотность запасенной энергии значительно превосходят данные, полученные на промышленном пьезоматериале ЦТС-19.

Следует отметить, что значения остаточной поляризации у образцов пьезоэлементов из модельного материала ЦТС-19 коррелируют с литературными данными, что свидетельствует о корректности выбранной методики и эксперимента в целом [18–20].

Выводы. Пьезокерамические материалы с низким содержанием титана, расположенные по составу вблизи границы между СЭ и АСЭ фазами обладают высокой остаточной поляризацией. Как показывает эксперимент, у исследуемого состава, полученная остаточная поляризация выше на 10 %, чем у промышленно выпускаемого, и широко используемого ЦТС-19, а значение диэлектрической проницаемости в 9 раз ниже. Из этого следует, что более высокие значения плотности энергии W следует ожидать у материалов с низким содержанием титана, расположенных по составу вблизи границы между СЭ и АСЭ фазами. По результатам экспериментальных данных у исследованного состава это значение в 22 раза превосходит пьезоматериал ЦТС-19.

Таким образом, совокупность полученных электрофизических параметров позволяет сделать вывод о преимуществах пьезокерамических материалов с низким содержанием титана, расположенных по составу вблизи границы между СЭ и АСЭ фазами, в целях получения коротких высоковольтных импульсов в устройствах генерации электрической энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shkuratov S.I., Talantsev E.F., Menon L., Temkin H., Baird J., Altgilbers L.L. Compact high-voltage generator of primary power based on shock wave depolarization of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics // Review of Scientific Instruments. – 2004. – Vol. 75 (8). – P. 2766-2769.

2. *Лайнс М., Гласс А.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981. – 736 с.
3. *Bauer F., Vollrath K.* Behaviour of non-linear ferroelectric ceramics under shock waves // *Ferroelectrics*. – 1976. – Vol. 12. – P. 153-156.
4. *Lysne P.C., Percival C.M.* Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramics: Normalmode response of PZT 95/5 // *J. Appl. Phys.* – 1975. – Vol. 46, No. 4. – P. 1519-1525.
5. *Bauer F., Vollrath K., Fétiveay Y., and Eyraud L.* Ferroelectric ceramics: Application to mechanical-electrical energy conversion under shock compression // *Ferroelectrics*. – 1976. – Vol. 10, No. 1. – P. 61-64.
6. *Shkuratov S.I., Baird J., Antipov V.G., Talantsev E.F., Lynch C.S., Altgilbers L.L.* PZT 52/48 depolarization: Quasi-static thermal heating versus longitudinal explosive shock // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2010. – Vol. 38 (8). – P. 1856-1863.
7. *Linde R.K.* Depolarization of ferroelectrics at high strain rates // *Journal of Applied Physics*. – 1967. – Vol. 38 (12). – P. 4839-4842.
8. *Lysne P.C.* Resistivity of shock-wave-compressed PZT 95/5 // *Journal of Applied Physics*. – 1977. – Vol. 48 (11). – P. 4565-4568.
9. *Shkuratov S.I., Baird J., Talantsev E.F.* The depolarization of Pb(Zr0.52Ti0.48)O3 ferroelectrics by cylindrical radially expanding shock waves and its utilization for miniature pulsed power // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82 (5).
10. *Avdeev M., Jorgensen J.D., Short S., Samara G.A., Venturini E.L., Yang P., Morosin B.* Pressure-induced ferroelectric to antiferroelectric phase transition in Pb0.99 (Zr0.95 Ti0.05) 0.08 Nb0.2 O3 // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. – 2006. – Vol. 73 (6).
11. *Jiang Y., Wang X., Zhang F., He H.* Breakdown and critical field evaluation for porous PZT 95/5 ferroelectric ceramics under shock wave compression // *Smart Materials and Structures*. – 2006. – Vol. 23 (8).
12. *Setchell R., Montgomery S., Chhabildas C.* The effects of shock stress and field strength on shock-induced depoling of normally poled PZT 95/5 // *AIP Conf. Proc.* – 2000. – Vol. 505. – P. 979.
13. *Cheret R., Andriot P., Chapron P., Le Drean C., Lezaud J.M., Loichot R., Martineau J., and Olive F.* Shock-wave experiments using explosives and light-gas gun facilities // *AIP Conf. Proc.* – 1982. – Vol. 78. – P. 626.
14. *Doran D.G.* Shock-wave compression of barium titanate and 95/5 lead zirconate titanate // *Journal of Applied Physics*. – 1968. – Vol. 39 (1). – P. 40-47.
15. *Lysne P.C., Percival C.M.* Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramics: Normal-mode response of PZT 95/5 // *Journal of Applied Physics*. – 1975. – Vol. 46 (4). – P. 1519-1525.
16. *Cho K.H., Seo C.E., Choi Y.S., Ko Y.H., Kim K.J.* Effect of pressure on electric generation of PZT(30/70) and PZT(52/48) ceramics near phase transition pressure // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2012. – Vol. 32 (2). – P. 457-463.
17. *Fétiveauj Y., Eyraudi L.* Ferroelectric Ceramics: Application to Mechanical Electrical Energy Conversion Under Shock Compression // *Ferroelectrics*. – 1976. – Vol. 10 (1). – P. 61-64.
18. *Lysne P.C.* Shock-induced polarization of a ferroelectric ceramic // *Journal of Applied Physics*. – 1977. – Vol. 48 (3). – P. 1024-1031.
19. *Setchell R.E., Montgomery S.T., Cox D.E., Anderson M.U.* Initial temperature effects on the dielectric properties of PZT 95/5 during shock compression // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – Vol. 955. – P. 193-196.
20. *Bragunets V.A., Simakov V.G., Borisenok V.A., Borisenok S.V., Kruchinin V.A.* Shock-induced electrical conductivity in some ferroelectrics // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2010. – Vol. 46 (2). – P. 231-236.

REFERENCES

1. *Shkuratov S.I., Talantsev E.F., Menon L., Temkin H., Baird J., Altgilbers L.L.* Compact high-voltage generator of primary power based on shock wave depolarization of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, *Review of Scientific Instruments*, 2004, Vol. 75 (8), pp. 2766-2769.
2. *Layns M., Glass A.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы [Ferroelectrics and related materials]. Moscow: Mir, 1981, 736 p.

3. Bauer F., Vollrath K. Behaviour of non-linear ferroelectric ceramics under shock waves, *Ferroelectrics*, 1976, Vol. 12, pp. 153-156.
4. Lysne P.C., Percival C.M. Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramics: Normalmode response of PZT 95/5, *J. Appl. Phys.*, 1975, Vol. 46, No. 4, pp. 1519-1525.
5. Bauer F., Vollrath K., Fétique Y., and Eyraud L. Ferroelectric ceramics: Application to mechanical-electrical energy conversion under shock compression, *Ferroelectrics*, 1976, Vol. 10, No. 1, pp. 61-64.
6. Shkuratov S.I. Baird J. Antipov V.G. Talantsev E.F. Lynch C.S. Altgilbers L.L. PZT 52/48 depolarization: Quasi-static thermal heating versus longitudinal explosive shock, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, Vol. 38 (8), pp. 1856-1863.
7. Linde R.K. Depolarization of ferroelectrics at high strain rates, *Journal of Applied Physics*, 1967, Vol. 38 (12), pp. 4839-4842.
8. Lysne P.C. Resistivity of shock-wave-compressed PZT 95/5, *Journal of Applied Physics*, 1977, Vol. 48 (11), pp. 4565-4568.
9. Shkuratov S.I., Baird J., Talantsev E.F. The depolarization of Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ ferroelectrics by cylindrical radially expanding shock waves and its utilization for miniature pulsed power, *Review of Scientific Instruments*, 2011, Vol. 82 (5).
10. Avdeev M., Jorgensen J.D., Short S., Samara G.A., Venturini E.L., Yang P., Morosin B. Pressure-induced ferroelectric to antiferroelectric phase transition in Pb_{0.99}(Zr_{0.95}Ti_{0.05})_{0.08}Nb_{0.2}O₃, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2006, Vol. 73 (6).
11. Jiang Y., Wang X., Zhang F., He H. Breakdown and critical field evaluation for porous PZT 95/5 ferroelectric ceramics under shock wave compression, *Smart Materials and Structures*, 2006, Vol. 23 (8).
12. Setchell R., Montgomery S., Chhabildas C. The effects of shock stress and field strength on shock-induced depoling of normally poled PZT 95/5, *AIP Conf. Proc.*, 2000, Vol. 505, pp. 979.
13. Cheret R., Andriot P., Chapron P., Le Drean C., Lezaud J.M., Loichot R., Martineau J., and Olive F. Shock-wave experiments using explosives and light-gas gun facilities, *AIP Conf. Proc.*, 1982, Vol. 78, pp. 626.
14. Doran D.G. Shock-wave compression of barium titanate and 95/5 lead zirconate titanate, *Journal of Applied Physics*, 1968, Vol. 39 (1), pp. 40-47.
15. Lysne P.C., Percival C.M. Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramics: Normal-mode response of PZT 95/5, *Journal of Applied Physics*, 1975, Vol. 46 (4), pp. 1519-1525.
16. Cho K.H., Seo C.E., Choi Y.S., Ko Y.H., Kim K.J. Effect of pressure on electric generation of PZT(30/70) and PZT(52/48) ceramics near phase transition pressure, *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, Vol. 32 (2), pp. 457-463.
17. Fétique Y., Eyraudi L. Ferroelectric Ceramics: Application to Mechanical Electrical Energy Conversion Under Shock Compression, *Ferroelectrics*, 1976, Vol. 10 (1), pp. 61-64.
18. Lysne P.C. Shock-induced polarization of a ferroelectric ceramic, *Journal of Applied Physics*, 1977, Vol. 48 (3), pp. 1024-1031.
19. Setchell R.E., Montgomery S.T., Cox D.E., Anderson M.U. Initial temperature effects on the dielectric properties of PZT 95/5 during shock compression, *AIP Conference Proceedings*, 2007, Vol. 955, pp. 193-196.
20. Bragunets V.A., Simakov V.G., Borisenok V.A., Borisenok S.V., Kruchinin V.A. Shock-induced electrical conductivity in some ferroelectrics, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2010, Vol. 46 (2), pp. 231-236.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.К. Шелковников.

Дыкина Любовь Александровна – Южный федеральный университет, Институт высоких технологий и пьезотехники; e-mail: dykina@mail.ru, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; начальник отдела.

Панич Александр Анатольевич – e-mail: rctt.rctt@mail.ru, директор института.

Скрылев Александр Владимирович – e-mail: skrylyov@sfnedu.ru; ведущий инженер.

Проскорякова Юлия Анатольевна – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: ydo@yandex.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пр-т. Ленина 2; доцент.

Dykina Lyubov Alexandrovna – Southern Federal University, Institute for Advanced Technologies and Piezotechnics; e-mail: diykina@mail.ru; 344090, Rostov-on-Don, Milchakova street, 10; chief of laboratory.

Panich Alexander Anatol'evich – e-mail: rctt.rctt@mail.ru, director; professor.

Skrylev Alexander Vladimirovich – e-mail: skrylyov@sfnedu.ru, leading engineer.

Proskoryakova Yulia Anatol'evna – Rostov State Transport University; e-mail: ydo@yandex.ru, 344038, Rostov-on-Don, av. Lenina, 2; associate professor.

УДК 53.082.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-179-189

О.В. Зацекляный

АЛГОРИТМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛОТНОМЕРОВ

Рассматривается дополнительная температурная погрешность вибрационных плотномеров жидкостей и газов, а именно проблема влияния изменения температуры среды на частоту колебаний вибропреобразователей плотности. Описывается принцип действия и преимущества вибрационных плотномеров. Приводится анализ и описание существующих алгоритмов вычисления плотности и активной термокомпенсации, а также их недостатки. Указывается на серьёзные ограничения температурного диапазона калибровки существующих методов, связанные с обязательным применением дистиллированной воды. Опираясь на проведённое ранее моделирование вибропреобразователя и на выявленную основную роль температурных свойств модуля упругости металла, предложен новый алгоритм термокомпенсации без применения жидкостей-компараторов. Приводятся преимущества нового алгоритма, связанные с использованием вакуума в качестве среды, окружающей вибропреобразователь. В качестве основного преимущества приводится значительное расширение калибруемого температурного диапазона. Предполагается возможность применения алгоритма для калибровки плотномеров при экстремально низких и высоких температурах. Приведены формулы вычисления значения периода колебаний преобразователя, с учётом температурных изменений - термокомпенсированного периода. Описаны преимущества применения в качестве градуировочной функции полинома второго порядка с нулевым линейным членом. Подробно описаны методики проведения экспериментов, виды оборудования и средств измерений. Представлены полученные экспериментальные данные для вибропреобразователей из трёх разных металлов. Проведён анализ полученных данных и сделан вывод о целесообразности применения предложенного алгоритма термокомпенсации вибропреобразователей плотности жидкостей и газов.

Вибропреобразователь; плотномер; дополнительная погрешность от температуры; алгоритм термокомпенсации; жидкость-компаратор; калибровочные коэффициенты.

O.V. Zatserklyanyi

ALGORITHM FOR TEMPERATURE CORRECTION OF VIBRATION DENSITY METERS

In this article additional temperature error of vibration density meters in liquids and gases is reviewed. Particularly scrutinized are the effects of change in the temperature of the medium on the vibration frequency of the density vibration transducers. Main principle of operation and advantages of vibration density meters is described. The article analyzes and describes the existing algorithms of calculating density and active temperature compensation as well as the disadvantages of those algorithms. It points out to the significant limitations of temperature calibration diapason of the existing methods which relate to the necessity of using distilled water. Basing on the previous vibration transducer simulation and on the established main func-