



## Температурная зависимость эффективности устройства накопления энергии на основе релаксора PMN-0,33РТ

Ле Ван Зьонг<sup>1</sup>, А.Н. Соловьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГТУ им. Ле Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам

<sup>2</sup>Донской Государственный Технический Университет, 344000, Ростов – на – Дону

**Аннотация:** В работе исследуется эффективность устройства накопления на основе пьезоэлектрического генератора (ПЭГ) в виде биморфа, представляющего собой круглую пластину с инерционной массой, в качестве активного материала используется релаксор PMN-0,33РТ. Пластина закреплена по контуру в корпусе устройства, которое совершает вертикальные гармонические колебания с заданной амплитудой и частотой. Исследования проводятся на основе конечно-элементного (КЭ) моделирования и численного расчета в пакете ANSYS. Примечательной особенностью релаксоров является существенная зависимость их свойств от температуры, поэтому в работе исследуются зависимости от рабочей температуры и величины активной нагрузки резонансных частот, выходных напряжений и электрических мощностей устройства при колебаниях на этих частотах. На основании проведенных расчетов установлены величины активных сопротивлений внешней электрической цепи для различных диапазонов температур, при которых устройство наиболее эффективно.

**Ключевые слова:** накопление энергии, релаксор-сегнетоэлектрик, ПЭГ.

**Введение.** Накопления энергии предназначены для получения энергии из среды, окружающей систему, и преобразования ее в полезную электрическую энергию для питания каких-либо полезных устройств. Концепция накопления энергии движется вперед к разработке устройств с автономным питанием, которые не требуют замены элементов питания [1-3].

Материал и структура устройства накопления энергии являются основными факторами, влияющими на чувствительность приема и эффективную работу устройства. Превосходные пьезоэлектрические свойства монокристаллических материалов на основе кристалла релаксора-сегнетоэлектрика и их композиты привлекают значительный научный интерес в последние годы [5-8]. Эффективные пьезоэлектрические и диэлектрические свойства данных композитов способствуют их применению в качестве активных элементов актюаторов, сенсоров, гидрофонов и т.д. Современные композиты на основе кристалла релаксора-сегнетоэлектрика PMN-0,33РТ представляют интерес благодаря высокой пьезоактивности [5, 9, 10]. Монокристаллический материал



на основе кристалла релаксора-сегнетоэлектрика PMN-0,33РТ, использующийся в качестве элементов актюаторов, пьезопреобразователей и многих других пьезотехнических устройств, отличаются высокими значениями  $d_{33}$  и  $d_{31}$  [5]. В этих кристаллах получены величины пьезоэлектрических коэффициентов  $d_{33}$  более  $1500 \div 2000$  пКл/Н, что в несколько раз выше, чем в лучшей современной пьезокерамике. Столь большие величины пьезокоэффициентов, наряду с высокими значениями коэффициентов электромеханической связи (более 90%), открывают широкие перспективы использования монокристаллов в системах высокоточного позиционирования, элементов актюаторов, пьезопреобразователей и многих других пьезотехнических устройств.

Кроме того, как уже известно, что сегнетоэлектрики-релаксоры обладают наиболее широким рабочим температурным диапазоном. В релаксорах возможно наблюдать постепенный рост поляризации до температуры Кюри с последующим переходом в сегнетоэлектрически-подобный рост спонтанной поляризации ниже температура Кюри. Это проявляется очень широким пиком на температурной зависимости диэлектрической проницаемости с сильным температурным гистерезисом и частотной дисперсией. Значения электроупругих модулей PMN-0,33РТ приведены в таб. 1 [9, 10]. На рис. 1 представлены зависимости относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$  PMN-0,33РТ от температуры [9].

Таблица 1 - Модули упругости  $c_{ij}^E$  (в  $10^{10}$  Па), пьезоэлектрические коэффициенты  $e_{ij}$  (в Кл/м<sup>2</sup>), пьезоэлектрические модули  $d_{ij}$  (в пКл/Н) [10]

$c_{11}^E$	$c_{12}^E$	$c_{13}^E$	$c_{33}^E$	$c_{44}^E$	$c_{66}^E$	$e_{15}$	$e_{31}$	$e_{33}$	$d_{15}$	$d_{31}$	$d_{33}$
11,5	10,3	10,2	10,3	6,9	6,6	10,1	-3,9	20,3	146	-1330	2820
$\pm 0,15$	$\pm 0,16$	$\pm 0,15$	$\pm 0,3$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,9$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 16$	$\pm 19$	$\pm 75$

$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м, плотность  $\rho = 8060$  кг/м<sup>3</sup>.

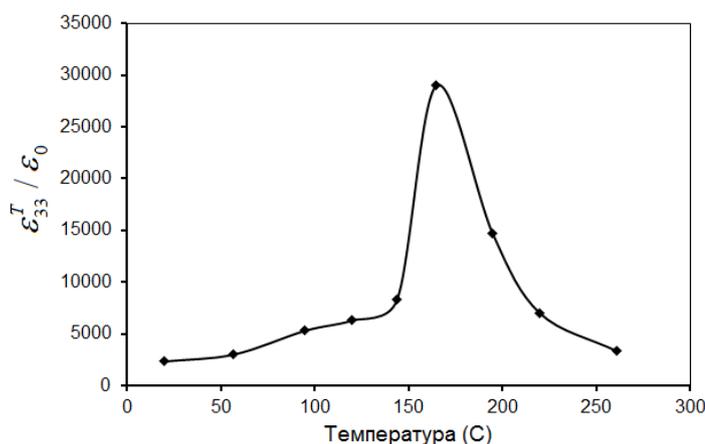


Рис. 1. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости PMN-0,33PT от температуры [9].

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры на эффективную работу ПЭГ, в котором используется сегнетоэлектрик-релаксор PMN-0,33PT. Моделирование проводится в КЭ пакете ANSYS.

### 1. Модель устройства накопления энергии

В настоящей работе рассматривается ПЭГ, являющийся главным элементом устройства накопления энергии в форме круглой пластины, имеющий конструкцию биморфа с двумя тонкими симметрично расположенными активными слоями в форме тонких круглых пластин и дисковидным центральным несущим слоем, схема такого устройства представлены на рис. 2. Активный элемент состоит из сегнетоэлектриков-релаксоров PMN-0,33PT. ПЭГ моделируется в рамках линейной теории электроупругости [3].

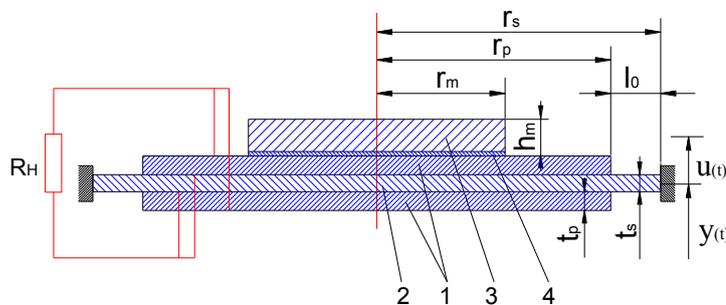


Рис. 2. Схема ПЭГ:

1 – активный элемент; 2 – пластина; 3 – элемент инерционный; 4 – соединительный слой.



Рассматриваемая задача решается при условии, что на размеры ПЭГ: толщина и радиус пластины  $t_s \times r_s = 0,1 \times 40 \text{ мм}^2$  (материал пластины - сталь); активный элемент - сегнетоэлектрик-релаксор PMN-0,33РТ, и толщина и радиус его  $t_p \times r_p = 0,14 \times 22 \text{ мм}^2$ ; радиус и высота инерционного элемента  $r_m \times h_m = 16 \times 7 \text{ мм}^2$  (материал инерционного элемента - свинец); размер  $l_0 = 2 \text{ мм}$  постоянен.

Устройство накопления энергии совершает малые колебания в подвижной системе координат. Внешние возбуждения имеет вид

$$y = y_0 e^{-i(2\pi f)t}, \quad (1)$$

где  $y_0$  – амплитудное колебание ( $y_0 = 0,1 \text{ мм}$ ),  $f$  – частота колебаний в Гц.

## 2. Континуальные постановки задач электроупругости

ПЭГ представляет собой составное упругое и электроупругое тело, которое совершает малые колебания в подвижной системе координат. В этих условиях достаточно адекватной математической моделью функционирования устройства является начально-краевая задача линейной теории электроупругости [4].

Рассмотрим некоторый пьезопреобразователь  $\Omega$ , представленный набором областей  $\Omega_j = \Omega_{pk}$ ;  $k=1, 2, \dots, N_p$ ;  $j=k$  со свойствами пьезоэлектрических материалов и набором областей  $\Omega_j = \Omega_{em}$ ;  $m=1, 2, \dots, N_e$ ;  $j=N_p+m$  со свойствами упругих материалов. Будем считать, что физико-механические процессы, происходящие в средах  $\Omega_{pk}$  и  $\Omega_{em}$ , можно адекватно описать в рамках теорий пьезоэлектричества (электроупругости) и упругости.

Для пьезоэлектрических сред  $\Omega_j = \Omega_{pk}$  предположим, что выполняются следующие полевые уравнения и определяющие соотношения:

$$\rho_{pk} \ddot{\mathbf{u}}_j; \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}_j^E \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta}_{dj} \dot{\boldsymbol{\zeta}}_d); \quad \mathbf{D} + \boldsymbol{\zeta}_d \dot{\boldsymbol{\zeta}}_d; \quad \boldsymbol{\zeta}_d \dot{\boldsymbol{\zeta}}_d, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2; \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (4)$$



где  $\rho(x)$  – плотность материала;  $\mathbf{u}(x,t)$  – вектор-функция перемещений;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор механических напряжений;  $\mathbf{f}$  – вектор плотности массовых сил;  $\mathbf{D}$  – трехмерный вектор индукции электрического поля;  $\mathbf{c}_j^E$  – тензор четвертого ранга упругих модулей, измеренных при постоянном электрическом поле;  $\mathbf{e}_j$  – тензор пьезомодулей третьего ранга;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – тензор деформаций;  $\mathbf{E}$  – трехмерный вектор напряженности электрического поля;  $\phi(x,t)$  – функция электрического потенциала;  $\boldsymbol{\varepsilon}_j^S$  – тензор второго ранга диэлектрических проницаемостей, измеренных при постоянной деформации;  $\alpha_{dj}$ ,  $\beta_{dj}$ ,  $\zeta_d$  – неотрицательные коэффициенты демпфирования [4], а остальные обозначения стандартны для теории электроупругости, за исключением дополнительного индекса "j", указывающего на принадлежность к среде  $\Omega_j$  с номером j.

Для сред  $\Omega_j = \Omega_{em}$  с чисто упругими свойствами будем учитывать только механические поля, для которых примем аналогичные (2) - (4) полевые уравнения и определяющие соотношения в пренебрежении электрическими полями и эффектами пьезоэлектрической связности.

К уравнениям (2) - (4) добавляются механические и электрические граничные условия, а также начальные условия в случае нестационарной задачи, среди которых отметим условие на электроде  $S_e$  связанным с электрической цепью устройства накопления энергии.

$$\int_{S_e} I \quad , \quad (5)$$

где  $I$  - ток в цепи, который в случае свободного электрода равен нулю.

### 3. Результаты конечноэлементного моделирования.

На основе краевой задачи (2)-(5) с условием кинематического возбуждения (1) были построены КЭ модели ПЭГ (рис.2) в осесимметричной постановке. С помощью этих моделей проведены численные расчеты в которых изучается влияние температуры на первую собственную резонансную частоту.

ту, выходное напряжение и выходную электрическую мощность ПЭГ при колебаниях на этих частотах.

На рис. 3 представлены результаты зависимости значений первой собственной частоты от температуры. Из рис.3 видно, что зависимость первой резонансной частоты от температуры имеет минимум в районе температуры Кюри. Значение первой резонансной частоты изменяется в частотном диапазоне 56÷61 Гц при температуре, изменяющейся в интервале 20÷260(°C), отметим, что диапазон собственных частот для ПЭГ с сегнетоэлектриком-релаксором PMN-0,33PT значительно меньше соответствующих частот для пьезокерамики PZT-4.

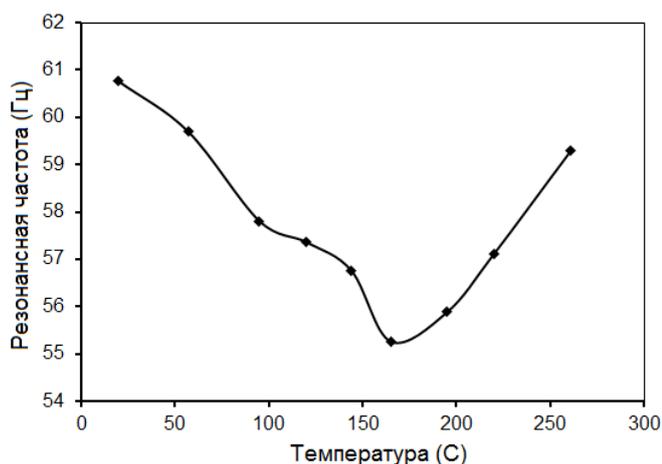


Рис. 3. Зависимости первой собственной частоты от температуры.

Далее исследуется зависимость выходных потенциала  $V$  и электрической мощности  $W^*$  от температуры с различными значениями сопротивления активной нагрузки (рис.4).

Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что при малых сопротивлениях ( $R_n < 1,5 \text{ кОм}$ ) выходной потенциал несущественно зависит от температуры, тогда, как при больших сопротивлениях имеет ярко выраженный минимум в районе температуры Кюри (рис. 4,а). По сравнению с выходным потенциалом зависимость выходной мощности от величины сопротив-

\*  $W=V^2/R_n$

ления и температуры более сложная (рис. 4,б). При малых значениях сопротивления  $R_n$  выходная мощность имеет выраженный максимум в районе температуры Кюри, который при увеличении  $R_n$  смещается в область более высоких температур. При дальнейшем росте  $R_n$  в районе температуры Кюри напротив появляется вначале локальный минимум, переходящий в последствии в глобальный. Анализ рис. 4,б позволяет выбрать оптимальную нагрузку  $R_n$  в интересующем диапазоне температур, например для температур из диапазона от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$  такой нагрузкой является  $R_n = 8\text{кОм}$ .

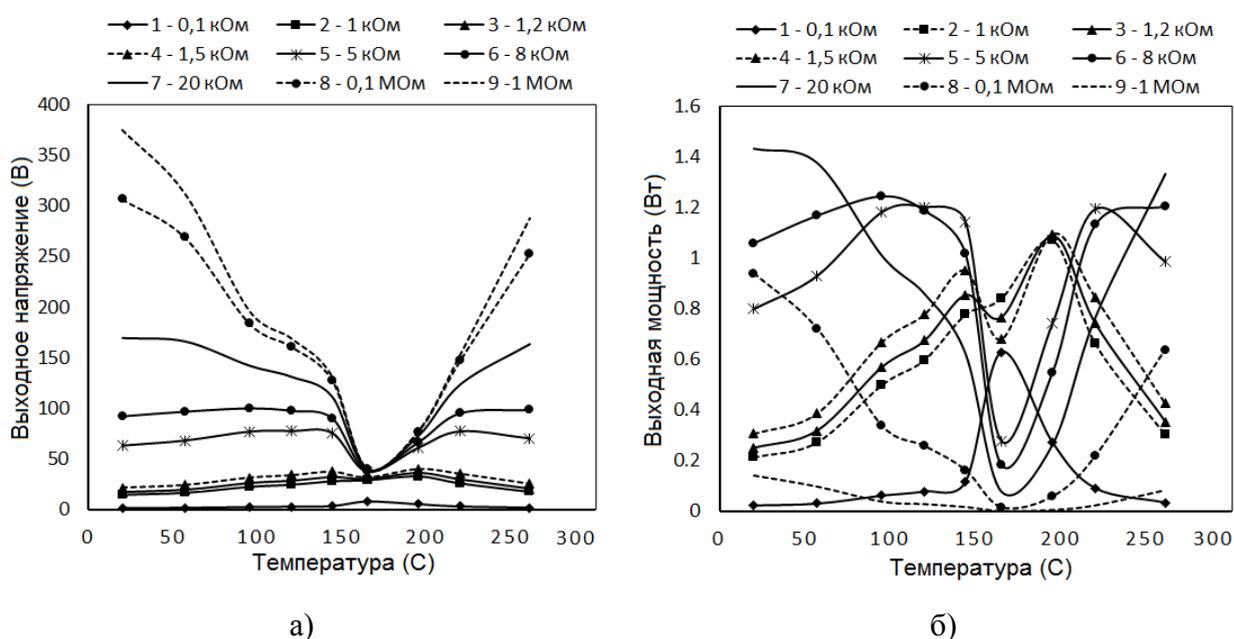


Рис. 4. Зависимости выходного потенциала (а) и мощности (б) от температуры при различных сопротивлениях нагрузки.

На рис. 5 представлены зависимости выходного напряжения (рис. 5,а) и мощности (рис. 5,б) при колебаниях на резонансных частотах от значения сопротивления активной нагрузки при различных температурах.

Из результатов расчетов (рис. 5,а) видно, что значение выходного напряжения монотонно возрастают с ростом сопротивления. Значение выходной мощности (рис. 5,б) для малых значений сопротивления наибольшее при температуре Кюри, и наоборот для больших сопротивлений в окрестности этой температуры наименьшее.

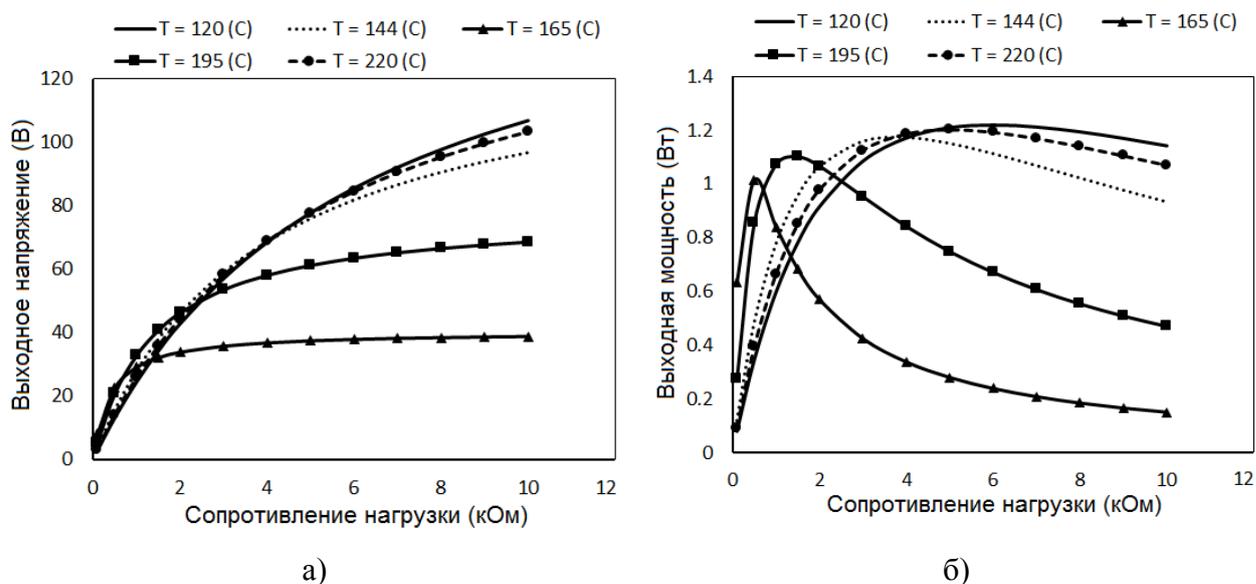


Рис. 5. Зависимости выходного потенциала (а) и мощности (б) от сопротивления активной нагрузки при различных температурах.

**Заключение.** В работе на основе КЭ моделирования в пакете ANSYS показано, что применение релаксора-сегнетоэлектрика может быть использовано как средство повышения эффективности пьезоэлектрических устройств, в частности ПЭГ. Однако, как, оказалось выходная мощность существенно зависит от соотношений между величинами активной нагрузки и рабочей температуры, что требует предварительного численного моделирования устройства, пример которого приведен в настоящей работе. Полученные результаты позволяют выбрать сопротивления внешней цепи в зависимости от температуры и частоты вынужденных колебаний для эффективной работы устройства. Учет этого обстоятельства может быть потенциально полезными, как в ПЭГ, так и иметь широкий диапазон применений в других устройствах с использованием пьезоэлектрических материалов.

## Литература



1. Ле В. Зыонг. Конечноэлементный анализ применимости прикладных теорий расчета пьезоэлектрического устройства накопления энергии стековой конфигурации. Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2310](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2310).
2. Ле В. Зыонг. Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрического устройства накопления энергии цилиндрической конструкции. Инженерный вестник Дона, 2015, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2912](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2912).
3. Соловьев А.Н., Ле В. Зыонг. Конечноэлементное моделирование и анализ пьезоэлектрического устройства накопления энергии в форме круглой пластины с пьезоэлементами. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. №4(1). с. 112-119.
4. Белоконь А.В., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств. Прикладная математика и механика. 2002. №3(66), с. 491–501.
5. Li Z., Huang A., Luan G., Zhang J. Finite element analyzing of underwater receiving sensitivity of PMN-0.33 PT single crystal cymbal hydrophone. Ultrasonics. 2006. V. 44. pp. 759-762.
6. Kandilian R., Navid A., Pilon L. The pyroelectric energy harvesting capabilities of PMN–PT near the morphotropic phase boundary. Smart Materials and Structures. 2011. V. 20, № 5. pp. 055020.
7. Algueró Giménez M., Jiménez B., Alemany C., Pardo L. Temperature dependence of the electrical, mechanical and electromechanical properties of high sensitivity novel piezoceramics. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2004. V. 43, № 2. pp. 540-543.
8. Ren K., Liu Y., Geng X., Hofmann H.F., Zhang Q.M. Single crystal PMN-PT/epoxy 1-3 composite for energy-harvesting application. Ultrasonics,



- Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on. 2006. V. 53, №. 3. pp. 631-638.
9. Pham-Thi M., Augier C., Dammak H., Gaucher P. Fine grains ceramics of PIN–PT, PIN–PMN–PT and PMN–PT systems: Drift of the dielectric constant under high electric field. Ultrasonics. 2006. V. 44. pp. 627-631.
10. Zhang R., Jiang B., Cao W. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of multidomain 0.67Pb (Mg 1/3 Nb 2/3) O 3–0.33PbTiO 3 single crystals. Journal of Applied Physics. 2001. №7(90). pp. 3471-3475.

### References

1. Le V. Duong. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2310](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2310).
2. Le V. Duong. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2015, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2912](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2912).
3. Solov'ev A.N., Le V. Duong. Ekologičeskij vestnik naučnyh centrov čornomorskogo ekonomičeskogo sotrudničestva. 2013. №4 (1). pp. 112-119.
4. Belokon' A.V., Nasedkin A.V., Solov'ev A.N. Prikladnaja matematika i mehanika. 2002. №3 (66), pp. 491–501.
5. Li Z., Huang A., Luan G., Zhang J. Ultrasonics. 2006. V. 44. pp. 759-762.
6. Kandilian R., Navid A., Pilon L. Smart Materials and Structures. 2011. V. 20, № 5. pp. 055020.
7. Algueró Giménez M., Jiménez B., Alemany C., Pardo L. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2004. V. 43, № 2. pp. 540-543.
8. Ren K., Liu Y., Geng X., Hofmann H.F., Zhang Q.M. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on. 2006. V. 53, №. 3. pp. 631-638.
9. Pham-Thi M., Augier C., Dammak H., Gaucher P. Ultrasonics. 2006. V. 44. pp. 627-631.



10. Zhang R., Jiang B., Cao W. Journal of Applied Physics. 2001. №7(90). pp. 3471-3475.