

УДК 537.9:539.3:53.06

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ,
ВЫЗВАННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ
ПЬЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Фурса Т. В.¹, Уцын Г. Е.², Осипов К. Ю.³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: fursa@tpu.ru

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 40), e-mail: uge23@rambler.ru

³Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия (634021, Томск, пл. Ак. Зуева, 1), e-mail: osipov@iao.ru

Предложена физико-математическая модель электрического отклика на упругое ударное возбуждение гетерогенных материалов, содержащих пьезоэлектрические включения. Для создания модели использованы классические теоретические соотношения. Установлено, что ток смещения, возникающий при возбуждении пьезоэлектрического источника акустоэлектрических преобразований акустической волной, пропорционален скорости смещения, обратно пропорционален кубу расстояния от источника до электрического приемника и зависит от геометрии расположения пьезоэлектрической оси источника относительно точки удара и электрического приемника. Проведены экспериментальные исследования параметров электрических откликов на упругое ударное возбуждение гипсовых моделей, содержащих единичные искусственные пьезоэлектрические включения. Установлена сходимость результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: акустоэлектрические преобразования, гетерогенные материалы, пьезоэлектрические включения, математическое моделирование.

THE INVESTIGATION OF ACOUSTOELECTRIC TRANSFORMATIONS CAUSED BY PULSE MECHANICAL EXCITATION OF ARENACEOUS HETEROGENEOUS MATERIALS

Fursa T. V.¹, Utsyn G. E.², Osipov K. Yu.³

¹National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin av, 30), e-mail: fursa@tpu.ru

²The Tomsk institute of radio electronics and electronic technics Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin av, 40), e-mail: uge23@rambler.ru

³V.E. Zuev Institute of atmospheric optics SB RAS, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, V.E. Zuevsq, 1), e-mail: osipov@iao.ru

It is proposed physico-mathematical model of electric response on elastic impact excitation of heterogeneous materials containing piezoelectric inclusion. To create the model the classical theoretical relations are used. It is established that the displacement current occurring due to excitation of acoustoelectric transformation in piezoelectric source by the acoustic wave is proportional to the displacement velocity and inversely proportional to the distance power of cube from the source to the electric receiver, and depends on the piezoelectric source axis geometry relatively to the impact point and the electric receiver. The electric response parameters to elastic impact excitation of gypsum models with artificial single piezoelectric inclusion are experimentally studied. The convergence of the results of mathematical modeling and experimental data is founded.

Keywords: acoustoelectric transformations, heterogeneous materials, piezoelectric inclusions, mathematical modeling.

Введение

В настоящее время существует большое количество экспериментальных данных по исследованию акустоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических и слабопроводящих материалах под действием импульсного механического возбуждения [1–4]. Суть явления акустоэлектрических преобразований состоит в смещении зарядов двойных

электрических слоев на границе раздела фаз в гетерогенных материалах и деформации пьезоэлектрических включений акустическими волнами, созданными импульсным механическим возбуждением. Показано, что основной вклад в генерирование электрического отклика на импульсное механическое возбуждение вносят пьезоэлектрические источники акустоэлектрических преобразований [2–3]. На основе этих исследований ведется разработка неразрушающих методов контроля структурных и механических характеристик гетерогенных материалов [5–8].

Для повышения точности разрабатываемых методов в рамках данной работы проведены экспериментальные и теоретические исследования акустоэлектрических преобразований при ударном возбуждении гетерогенных материалов, содержащих пьезоэлектрические включения. Типичными представителями таких материалов являются бетоны и горные породы, содержащие включения природного кварца.

Экспериментальные исследования были выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение образцов и регистрацию электрического отклика. Механическое возбуждение производили с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара, порядка 300 Н. Удар производился по металлической пластине, помещенной на поверхность образца в месте удара. Для регистрации электрического сигнала использовался дифференциальный электрический датчик, позволяющий существенно повысить соотношение сигнал-помеха. Измерительный приемник располагался на расстоянии 2 мм от поверхности образца, а компенсационный – параллельно измерительному на высоте 30 мм от него. Сигнал с электрического датчика регистрировался с помощью платы ввода-вывода «NIPCI-6251», позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала.

Проведенных экспериментальных исследований недостаточно для понимания закономерностей акустоэлектрических преобразований в образцах с определенной геометрией расположения относительно выбранной системы координат точки удара, источников акустоэлектрических преобразований, приемника электрического сигнала.

Для решения этих вопросов были проведены экспериментальные и теоретические исследования параметров электрического отклика на ударное возбуждение модели, содержащей единичный источник акустоэлектрических преобразований. В качестве источника был использован пьезоэлектрический элемент из ЦТС-керамики диаметром 5 мм и толщиной 2 мм. Модель представляла собой образец гипса размером 100x100x100 мм, в геометрический центр которой был помещен пьезоэлектрический элемент.

Тогда, мы имеем конфигурацию системы удара, источника внутри образца и заданной точки приемника такую, как показано на рисунке 1 (в двумерном приближении).

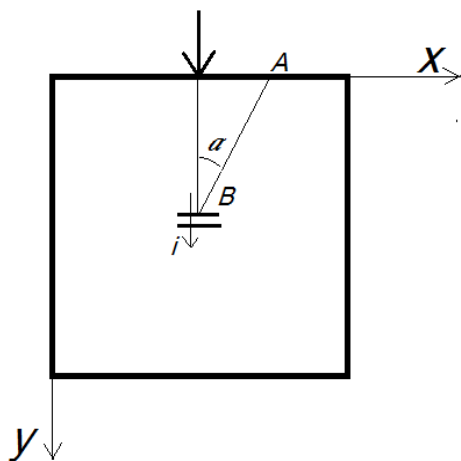


Рисунок 1. Схематическое расположение пьезоэлектрического источника в образце относительно заданного элемента электрического приемника

На рисунке символом \mathbf{P} обозначен единичный вектор направления дипольного момента пьезоэлемента, расположенного в точке B , численное значение которого является произведением величины заряда q на одной из поверхности на расстояние между поверхностями l (толщина пьезоэлемента). \mathbf{r} – радиус-вектор от источника к заданной точке A поверхности приемного датчика. Толстой стрелкой обозначено направление удара по образцу. Образец находится в системе координат x – y , α – угол между направлением дипольного момента и радиус-вектором \mathbf{r} .

Электрический сигнал из гетерогенных диэлектрических материалов представляет собой ток смещения, возникающий при деформации и смещении источников акустоэлектрических преобразований акустической волной [3, 8], формирующейся в образцах конечных размеров при ударном возбуждении. Ток смещения в диэлектриках определяется потоком вектора электрической индукции через некоторую поверхность:

$$\mathbf{I}_{sm} = \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dS$$

В общем виде вектор электрической индукции диполя, расположенного на расстоянии \mathbf{r} от рассматриваемой точки поля,

$$\mathbf{D} = \frac{3(\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} - \mathbf{P}}{r^3},$$

где \mathbf{n} – единичный вектор в направлении \mathbf{r} .

При расположении приемной пластины электрического датчика параллельно оси x ток смещения будет определяться вертикальной составляющей вектора индукции (D_y).

Вертикальная составляющая вектора электрической индукции в точке А при расположении пьезоэлектрического элемента параллельно приемнику (направление диполя совпадает с осью y) имеет вид:

$$D_y = \frac{P}{r^3} (3\cos^2 \alpha - 1) = \frac{q \cdot l}{r^3} (3\cos^2 \alpha - 1) \quad (1)$$

Заряд (q), возникающий при деформации пьезоэлектрического элемента, определяется через пьезоэлектрический модуль (d) и силу (F) как $q=d \cdot F$. l – толщина пьезоэлектрического элемента.

Временная зависимость $q(t)$ определяется силой, с которой акустическая волна при своем движении воздействует на источник в виде пьезоэлектрического элемента. Временные зависимости $l(t)$ и $r(t)$ обусловлены деформациями пьезоэлектрического элемента и материала образца в зоне источник – приемник под действием той же силы F , действующей в объеме образца в соответствии с законом Гука:

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L},$$

где $\sigma = F/S$; F – сила, действующая на площадку S ; E – модуль Юнга; ΔL – абсолютное перемещение на интервале длины L .

Так как ток смещения, протекающий через поверхность приемника, определяется скоростью изменения электрической индукции, определим элемент этого тока, продифференцировав по времени уравнение (1):

$$D_y'(t) = \left(\frac{q'(t) \cdot l(t)}{r(t)^3} + \frac{q(t) \cdot l'(t)}{r(t)^3} - \frac{3 \cdot q(t) \cdot l(t) \cdot r'(t)}{r(t)^4} \right) \cdot (3\cos^2 \alpha - 1)$$

где

$$q'(t) = \frac{d \cdot S \cdot E}{L} \cdot \frac{\partial \Delta L}{\partial t} = \frac{d \cdot S \cdot E}{L} V_y(t),$$

Где: S – площадь поперечного сечения образца гипса; E – модуль Юнга гипса; L – размер модели из гипса в направлении возбуждения; $V_y(t)$ – скорость смещения в гипсе вдоль оси y .

При деформации источника, пьезоэлектрическая ось которого направлена по оси y ,

$$l_y(t) = l + \Delta l_y(t); \quad r(t) = r + \Delta r(t):$$

$$l'(t) = v_y(t)$$

$v_y(t)$ – скорость смещения в пьезоэлементе,

$$r'(t) = \frac{V_y(t)}{\cos \alpha} - \frac{V_x(t)}{\sin \alpha}$$

$V_x(t)$ – скорость смещения в гипсе вдоль оси x .

Тогда:

$$D_y'(t) = k \cdot (3 \cos^2 \alpha - 1) \cdot \frac{1}{r^3} \left\{ l \cdot V_y(t) + \Delta L(t) \cdot v_y(t) - \frac{3 \cdot l \cdot \Delta L(t)}{r} \left[\frac{V_y(t)}{\cos \alpha} - \frac{V_x(t)}{\sin \alpha} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\text{Где: } k = \frac{d \cdot S \cdot E}{L}$$

Вторым и третьим слагаемыми в фигурных скобках выражения (2) можно пренебречь, по крайней мере, для случая, когда расстояние между зарядами в диполе (в данном случае l – это толщина пьезоэлектрического элемента, равная 2 мм) намного больше величины смещения, вызванного упругой волной, сформировавшейся в образце в результате удара.

Тогда полный ток смещения от единичного пьезоэлектрического источника:

$$I_{sm1}(t) = k \cdot l \int_{S_d} \frac{V_y(t)}{r^3} (3 \cos^2 \alpha - 1) dS_d,$$

где S_d – площадь измерительного электрического приемника.

Аналогичным образом был проведен расчет для случая, когда пьезоэлектрическая ось источника направлена по оси y :

$$I_{sm2}(t) = k \cdot l \int_{S_d} \frac{V_x(t)}{r^3} (3 \sin \alpha \cdot \cos \alpha) dS_d$$

Тогда соотношение между сигналами при различном расположении пьезоэлектрической оси источника относительно электрического приемника будет:

$$\frac{I_{sm1}(t)}{I_{sm2}(t)} = \left(\frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{3 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot \left(\frac{V_y(t)}{V_x(t)} \right) \quad (3)$$

Для экспериментальной проверки результатов математического моделирования было проведено испытание описанного выше гипсового образца с единичным пьезоэлектрическим включением в различных конфигурациях. В первой серии экспериментов было установлено расстояние между точкой удара и приемником электрических сигналов, равное 20 мм. Во второй серии расстояние от точки удара до приемника составляло 30 мм. Удар производился по центру образца. Были проведены измерения при расположении плоскости ударник-приемник перпендикулярно и параллельно пьезоэлектрической оси пьезоэлемента.

При такой геометрии эксперимента угол (α) между направлением дипольного момента пьезоэлектрического элемента и радиус-вектором от источника до приемного датчика равен 31^0 при расстоянии от точки удара до приемника 20 мм и 22^0 при расстоянии

30 мм. В этом случае первый сомножитель в формуле (3) для расстояния 20 мм равен 0.96, а для расстояния 30 мм – 1.6.

На рисунке 2 приведены электрические сигналы, зарегистрированные из модельного образца, при различном направлении пьезоэлектрической оси пьезоэлектрического элемента относительно измерительного приемника при расстоянии от точки удара до приемника, равном 20 мм.

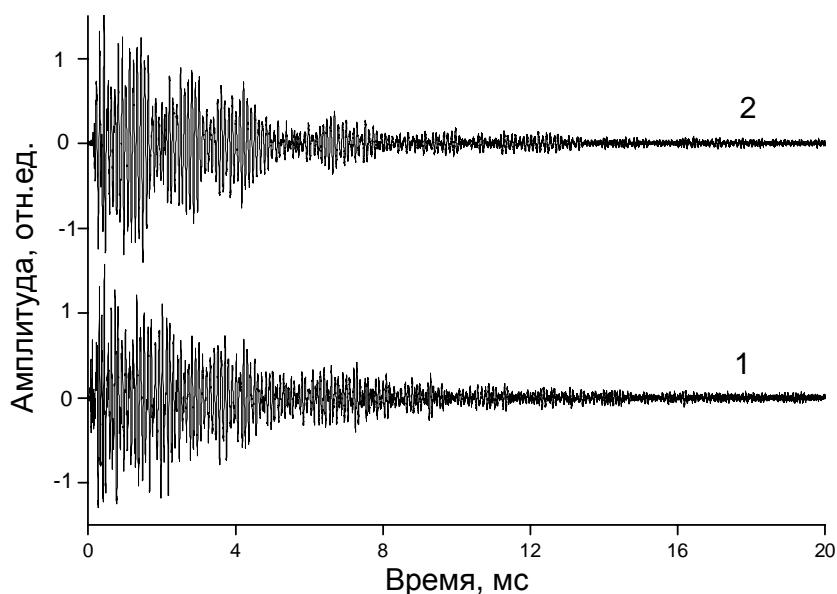


Рисунок 2. Электрические отклики из модели при расположении пьезоэлектрической оси пьезоэлектрического элемента: 1 – параллельно; 2 – перпендикулярно оси x.

Как видно из рисунка 2, величины электрических сигналов примерно одинаковы. Это более наглядно видно при сравнении энергетических спектров электрических откликов (рисунок 3).

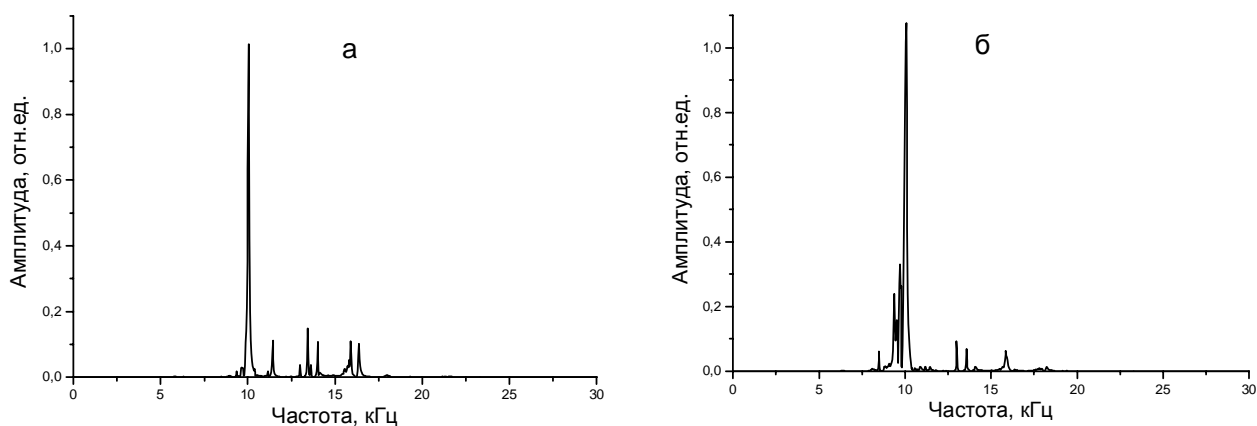


Рисунок 3. Энергетический спектр электрических откликов из модели при расположении пьезоэлектрической оси источника: а – параллельно; б – перпендикулярно оси x (при расстоянии между точкой удара и приемником 20 мм)

Из рисунка видно, что спектр электрического отклика имеет один ярко выраженный максимум на частоте порядка 10 кГц, что соответствует первой гармонике продольных акустических колебаний в данном образце. Остальные спектральные пики имеют значительно меньшую величину. При расстоянии от точки удара до приемника, равном 20 мм, первый сомножитель в формуле (3) равен 0.96, поэтому приблизительное равенство, как электрических откликов, так и наибольшего спектрального пика может свидетельствовать о равенстве или близком значении скоростей V_x и V_y при ударном возбуждении кубического образца.

На рисунке 4 приведены энергетические спектры при различном направлении пьезоэлектрической оси пьезоэлектрического элемента относительно измерительного приемника, при расстоянии от точки удара до приемника, равном 30 мм.

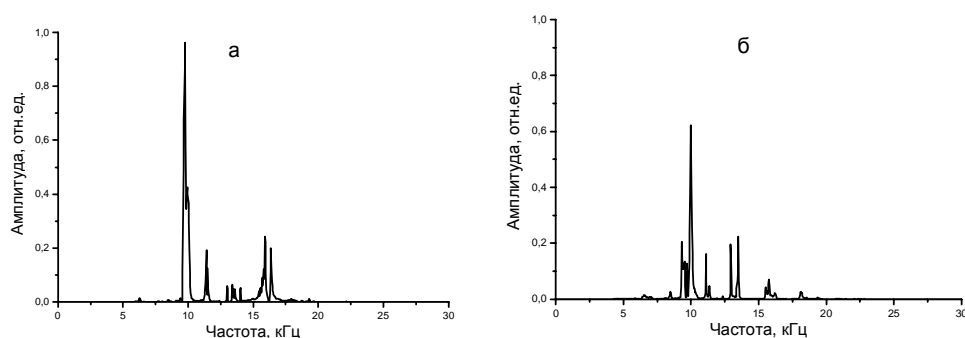


Рисунок 4. Энергетический спектр электрических откликов из модели при расположении пьезоэлектрической оси источника: а – параллельно; б – перпендикулярно оси x (при расстоянии между точкой удара и приемником 30 мм)

Как видно из рисунка, величина основного спектрального максимума при расположении плоскости ударник-приемник перпендикулярно пьезоэлектрической оси пьезоэлектрического элемента в 1.57 раза больше по сравнению с параллельным их расположением. Это хорошо согласуется с результатами расчета при расстоянии 30 мм.

Следовательно, предложенная модель акустоэлектрических преобразований, вызванных импульсным ударным возбуждением пьезосодержащих диэлектрических материалов, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Наука» (№ 7.1826.2011).

Список литературы

1. Суржиков А. П., Фурса Т. В. Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 4. – С. 71–76.
2. Фурса Т. В. О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. – С. 53–56.
3. Фурса Т. В., Данн Д. Д. Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения // ЖТФ. 2011. Т. 91. Вып. 8. – С. 53–58.
4. Фурса Т. В., Найден Е. П., Осипов К. Ю., Усманов Р. У. Особенности механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах в области структурных фазовых превращений // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 12. – С. 52–55.
5. Фурса Т. В., Суржиков А. П., Осипов К. Ю. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов // Дефектоскопия. 2007. № 2. – С. 27–34.
6. Фурса Т. В., Осипов К. Ю., Данн Д. Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // Дефектоскопия. 2011. № 5. – С. 39–47.
7. Фурса Т. В., Осипов К. Ю., Данн Д. Д. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов // Пат. 2453824 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N 3/32, опубликовано 20.06.2012. Бюл. 17.
8. Neishtadt N. M., Eppelbaum L. V., Levitski A. G. Case History Application of piezoelectric and seismoelectrokinetic phenomena in exploration geophysics: Review of Russian and Israeli experiences // Geophysics. 2006. Vol. 71. No. 2. – P. 41–53.

Рецензенты:

1. Люкшин Борис Александрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой механики и графики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.
2. Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора по научной работе Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.