

УДК [534.2:537.531]:004.001.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СЛОИСТОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Исаев Ю.Н., Васильева О.В.

ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» («Национальный исследовательский Томский политехнический университет»), Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

Работа посвящена моделированию преобразования акустического сигнала в электромагнитное излучение слоистых и дефектных структур. Приведены результаты математических расчетов изменения параметров электромагнитных сигналов в модельной слоистой и дефектной диэлектрической твердотельной структуре при импульсном акустическом возбуждении. Показано, что в результате акустоэлектрических преобразований происходит переизлучение на двойных электрических слоях энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. При этом амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием слоистых и дефектных структур. Рассматривается графическое представление скорости смещения точек в слоисто-неоднородном образце и возникающего в них давления, а также изменения заряда и тока смещения на границе раздела сред. Акустическое воздействие в реальных экспериментах имело форму, близкую к виду возбуждения, используемого для расчетов в данной работе.

Ключевые слова: дефектная структура, акустический импульс, переизлучение, электромагнитные сигналы, амплитудно-частотные параметры, моделирование, нестационарное уравнение акустики.

MODELLING OF TRANSFORMATION OF THE ACOUSTIC SIGNAL IN ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE LAYERED DIELECTRIC ENVIRONMENT

Isaev Y.N., Vasileva O.V.

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

Work is devoted to modeling of transformation of an acoustic signal in the electromagnetic radiation of layered and defective structures. Results of mathematical calculations of change parameters of electromagnetic signals are given in model layered and defective dielectric solid-state structure at pulse acoustic excitement. It is shown that acoustoelectric transformations are resulted by reradiation on double electric layers of energy of influencing acoustic impulses in energy of electromagnetic responses. Thus amplitude-frequency parameters of radiated electromagnetic signals are in a direct connection with characteristics of the determined acoustic influences and a charging condition of layered and defective structures. The graphical representation of speed of shift of points in a layered and non-uniform sample and pressure arising in them, and as changes of a charge and shift current on limit of the section of environments is considered. Acoustic influence in real experiments had a form close to a type of the excitement used for calculations in this work.

Keywords: defective structure, acoustic impulse, reradiation, electromagnetic signals, amplitude-frequency parameters, modeling, non-stationary equation of acoustics.

Введение

В работе моделируется связь параметров электромагнитных сигналов (ЭМС) гетерогенных слоистых и дефектных структур с детерминированным акустическим воздействием. В качестве физической модели в гетерогенных диэлектрических структурах используется возбуждение ЭМС в результате акустоэлектрических преобразований. Лабораторными экспериментальными исследованиями показано [1, 8], что такие преобразования являются одним из основных способов возбуждения ЭМС в гетерогенных материалах. Известно [4], что при подготовке разрушения твердых тел, в том числе и горных пород, наряду с имеющимися объемными дефектами, возникают протяженные нарушения в

виде микротрещин. При прорастании трещин возникают акустические импульсы с параметрами, определяемыми ее размерами и скоростью раскрытия [2, 5, 7].

Методика

В расчетах использовалась модель образца со слоистой диэлектрической структурой, который разделен на четыре равные части. Две крайние части имели плотность $\rho=10^3$ кг/м³, а средние части имели плотность $2 \cdot 10^3$ кг/м³ и $3 \cdot 10^3$ кг/м³ соответственно. Возбуждение производили точечным источником, расположенным на границе диэлектрического слоистого образца. Акустические возмущения имели вид сферических волн, которые приводили в движение двойные электрические слои на границах раздела сред и локальных неоднородностях образца.

Расчеты представим в следующей последовательности. Сначала определим распределение возмущений в модели путем решения нестационарного уравнения акустики с последующим определением распределения давления, скорости и плотности среды. Затем решим задачу возбуждения ЭМС колеблющимися зарядами или двойными электрическими слоями. Рассмотрим задачу возбуждения электромагнитных волн точечными диполями в среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью.

Расчеты возникающих смещений и давления в определенных точках модельной среды будем проводить в пренебрежении поперечных ультразвуковых волн. Распространение ультразвука в образце в одномерном приближении описывается следующими уравнениями акустики [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 a_0^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

Здесь $u(x,t)$ – смещение точек среды, $p(x,t)$ – давление, ρ_0 – плотность и a_0 – скорость распространения ультразвука в среде. Поскольку среда является слоисто-неоднородной, то распределение скорости акустической волны и плотности среды можно задать в виде кусочно-постоянных функций (рис.1).

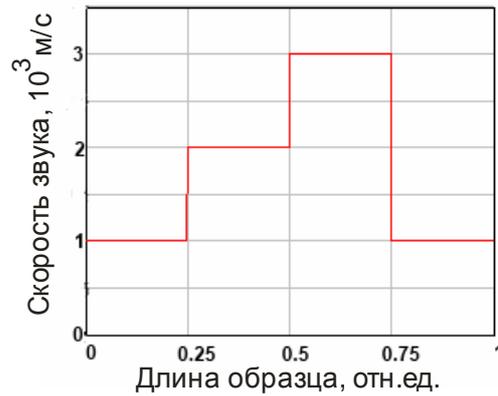


Рис. 1. Заданные значения скорости ультразвука в модельном образце со слоистой структурой

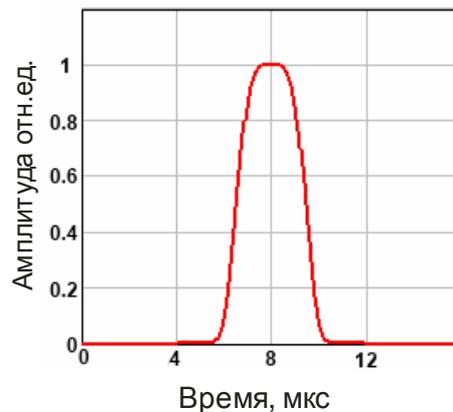


Рис. 2. Распределение давления акустического импульса на границе ввода

Экспериментальная часть

На вход образца подавали детерминированный акустический сигнал в виде импульсного воздействия заданной формы (рис. 2). Запишем уравнение в виде, удобном для численного моделирования:

$$\begin{pmatrix} 0 & \rho_0(x) \\ \frac{1}{\rho_0(x)a_0^2(x)} & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Решение уравнения (1) производили методом конечных элементов [6]. Результат решения уравнения приведен на рис. 3. Разными цветами на рис. 3, *a* показаны изменения скорости смещения частиц среды в разные промежутки времени при распространении акустического импульса через слоисто-неоднородный образец, а на рис. 3, *б* – динамика изменения давления, возникающего при таких смещениях. Границы слоистого раздела образца показаны вертикальными штриховыми линиями. Во врезке на рис. 3 в правом верхнем углу показаны моменты времени (в секундах), для которых были построены графики этих распределений.

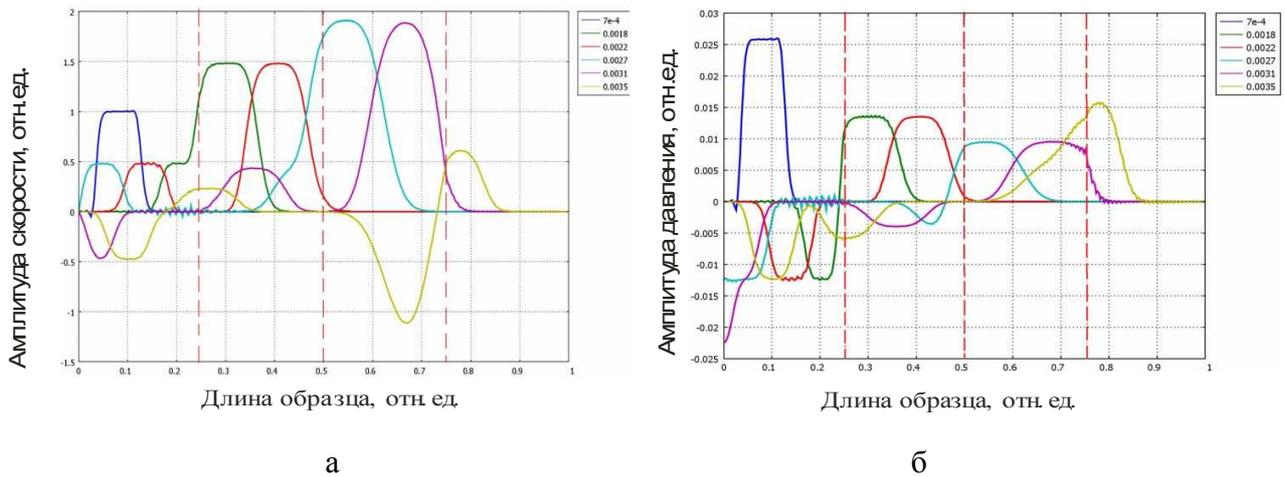


Рис. 3. Результат решения уравнения акустики: а) скорость смещения точек в слоисто-неоднородном образце; б) возникающее давление в точках

Таким образом, при прохождении акустических импульсов через среду со сложным структурным строением каждому моменту времени соответствует определенное смещение частиц и давление.

При прохождении акустического импульса через раздел сред, на границах возникают его отражения и преломление, а также колебания двойных электрических слоев. Колебания приводят к изменениям дипольных моментов и, как следствие, к излучению ЭМС. Распределение давления в фиксированной точке пространства, а именно – в точке раздела сред, будет зависеть только от времени $f(t) = P(x_0, t)$. Результат воздействия этого возмущения на границу раздела можно описать дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega^2 x = f(t),$$

где x – пространственная координата двойного электрического слоя, соответствующая отклонению слоя от положения равновесия, ω – основная частота колебаний, β – коэффициент упругости, $f(t)$ – импульсное акустическое воздействие. Для решения этого уравнения использовали численный метод Рунге – Кутты 4-го порядка, предварительно записав его в виде системы уравнений первого порядка:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ f(t) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Полученное решение является плечом диполя с зарядом q , которое смещается прямо пропорционально изменениям координаты $x(t)$. В результате дифференцирования выражения (2) получим ток, пропорциональный скорости смещения:

$$i(t) = \frac{d}{dt} q(t). \quad (3)$$

Это выражение пропорционально первому уравнению системы (2):

$$\dot{x} = y. \quad (4)$$

Таким образом, определены изменения заряда $q(t)$ и тока смещения $i(t)$. Полученные решения $q(t)$ и $i(t)$ раскладывались в ряд Фурье:

$$q(t) = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=0}^N a_k \sin(\omega_k t) + b_k \cos(\omega_k t) = \operatorname{Re} \left(\frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^N A_k \exp(-j\omega_k t) \right). \quad (5)$$

$$\text{где } T = 0.03 \text{ с}, \quad \omega_k = 2\pi k / T, \quad A_k = b_k + ja_k, \quad k = j..N$$

Коэффициенты разложения определяются выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T q(t) \sin(\omega_k t) dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T q(t) \cos(\omega_k t) dt.$$

Аналогичные операции справедливы и для тока смещения (3–5).

Поскольку решение дифференциального уравнения получено в дискретном виде, то для определения коэффициентов разложения использовалось быстрое преобразование Фурье при значениях $N = 2^9 - 1 = 511$. Результаты расчетов заряда $q(t)$, тока смещения $i(t)$ и их спектров для разных импульсных функций приведены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

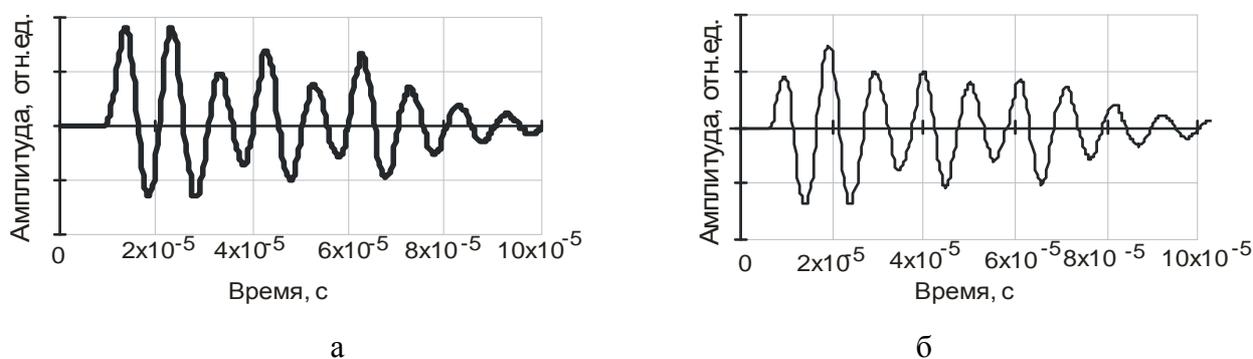


Рис. 4. Изменения на границе раздела сред: а) заряда $q(t)$; б) тока смещения $i(t)$

На рис. 4 видно, что изменение заряда на двойных электрических слоях под действием акустической волны приводит к возникновению и протеканию тока через образец. Рассчитанные амплитудно-частотные спектры изменяющегося заряда $q(t)$ и тока смещения $i(t)$ приведены на рис. 5, а и 5, б соответственно. Отличие наблюдается только в низкочастотной области спектров, поскольку заряд есть низкочастотная версия тока, в спектре заряда присутствуют низкочастотные компоненты. В результате изменений заряда $q(t)$ и тока смещения $i(t)$ слоистая диэлектрическая структура будет излучать ЭМС с

параметрами, определяемыми распространяющимся детерминированным акустическим импульсом.

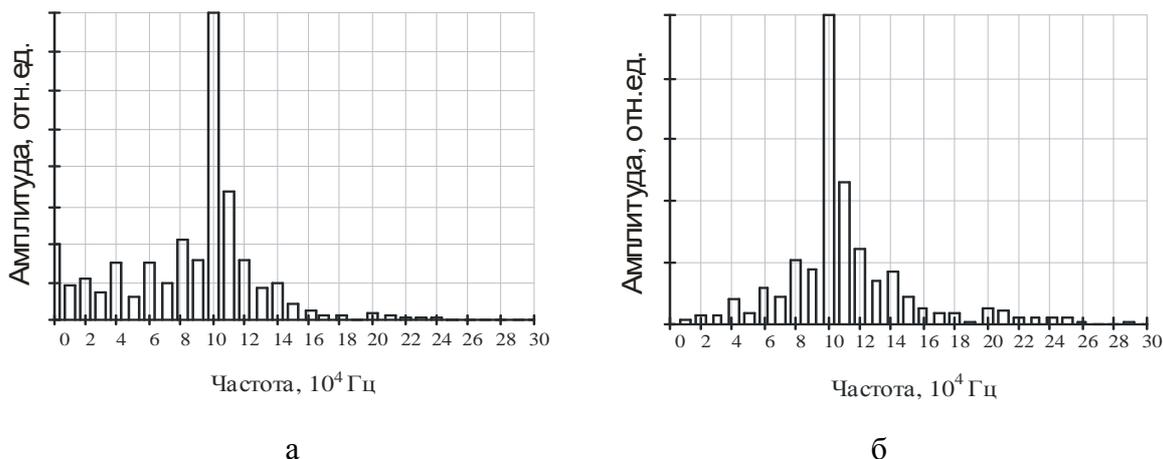


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр распределения: а) заряда $q(t)$; б) тока смещения $i(t)$

Таким образом, произведено математическое моделирование следующих процессов:

- возбуждения электромагнитных сигналов импульсным акустическим воздействием;
- влияния слоистости образцов на параметры электромагнитного отклика при детерминированном акустическом воздействии на такие структуры;
- изменение параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом.

Результаты

Расчеты по приведенным моделям показали, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием слоистых и дефектных структур. В реальных экспериментах акустическое возбуждение образцов диэлектрических материалов, в том числе горных пород, осуществляли с помощью пьезоэлектрического излучателя или ударом шарика из пружинного устройства. Акустическое воздействие имело форму близкую к виду возбуждения, используемого для расчетов и приведенного на рис. 2.

Список литературы

1. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // ФТПРПИ. – 2003. – № 2. – С.8–14.

2. Болотин Ю.И., Маслов Л.А., Полунин В.И. Установление корреляции между размером трещины и амплитудой импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 1975. – № 4. – С. 119–122.
3. Голямин И.П., Ультразвук, маленькая энциклопедия. – М: Советская энциклопедия, 1979. – 230 с.
4. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46–52.
5. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (Обзор) // Акустический журнал. – 2005. – Т.51, приложение. – С. 6–18.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. Носов В.В. Методика определения информативных параметров сигнала акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 1998. – № 5. – С. 91–98.
8. Kockavy P., Pavelka J., Sikula J. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources // Measurement Science and Technology. – 2004. – № 15. – P. 973–977.

Рецензенты:

Канев Ф.Ю., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.