

## Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения

© Т.В. Фурса, Д.Д. Данн

Национально-исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: fursa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 13 июля 2010 г. В окончательной редакции 11 января 2011 г.)

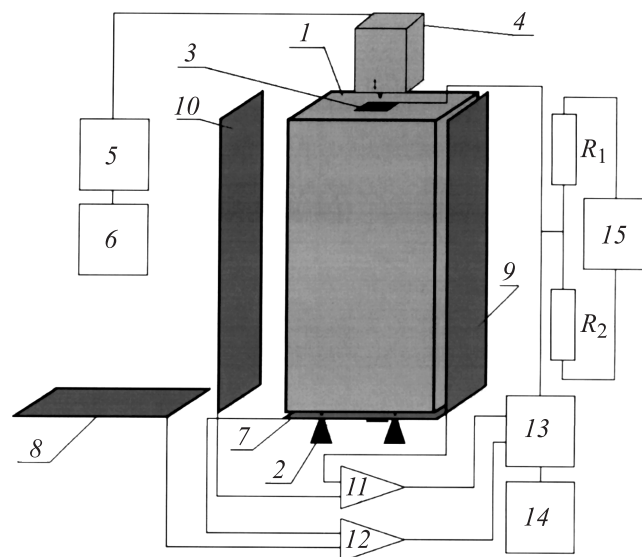
Проведены исследования закономерностей механоэлектрических преобразований на моделях с различной геометрией и концентрацией пьезоэлектрических включений. Установлено, что величина электрического сигнала уменьшается с увеличением глубины расположения пьезоэлектрического источника относительно приемного электрического датчика. Электрический отклик является разностным сигналом от двух противоположно заряженных поверхностей пьезоэлектрического источника при его деформации акустической волной возбуждения. Спектральная амплитуда электрических сигналов, регистрируемых из различных областей образца и из идентичных по составу образцов, содержащих большое количество пьезоэлектрических включений, имеет значительные различия и связана со случайной ориентацией пьезоэлектрических осей пьезокварца относительно электрического приемника. Поэтому разработка неразрушающих механоэлектрических методов контроля гетерогенных материалов, содержащих пьезоэлектрические включения, должна быть основана на поиске амплитудно-независимых критериев.

Композиционные диэлектрические материалы часто используются в конструкциях, где к ним предъявляются высокие требования по надежности, поэтому задача контроля их механических характеристик имеет важное практическое значение. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований при импульсном механическом возбуждении диэлектрических материалов [1–3]. На основе этих исследований разработан и запатентован способ неразрушающего контроля прочности гетерогенных материалов, алгоритм которого основан на использовании амплитудно-частотных характеристик электрического сигнала, возникающего при их ударном возбуждении [4]. Точность определения прочности в целом превышает известные механические методы, однако в отдельных случаях наблюдается значительная погрешность. Скорее всего, это связано с наличием в материале пьезоэлектрических включений. Некоторые гетерогенные материалы, такие, например, как бетоны, имеют в своем составе пьезоэлектрические включения, которые содержатся в речном песке, используемом для их изготовления, и в крупном заполнителе. Исследованию природы механоэлектрических преобразований в гетерогенных материалах, имеющих в своем составе пьезоэлектрические включения, и посвящена настоящая работа.

Исследования были выполнены с помощью лабораторного комплекса, схема которого изображена на рис. 1.

Образец 1 устанавливается на точечные опоры 2 на поверхность образца, в точке удара помещается металлическая подложка 3. Импульсное механическое возбуждение образцов производится электромеханическим ударным устройством 4, позволяющим производить однократный, нормированный по силе удар. В качестве ударного устройства использована катушка индуктивно-

сти с находящимся внутри ударным элементом — металлическим стержнем. Необходимая сила удара задается путем подачи на катушку определенного напряжения с регулируемого источника питания 6 через коммутационное реле 5. Удар производится по металлической подложке 3, которая помещается на заданную область поверхности образца. Подложка и сферический нако-

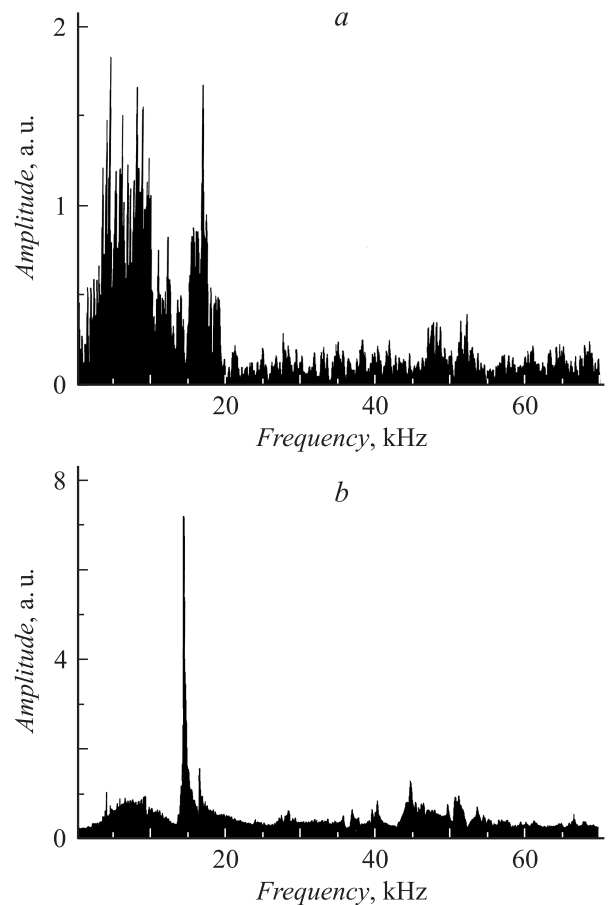


**Рис. 1.** Блок-схема установки для регистрации электрического отклика на ударное квазиупругое возбуждение гетерогенных материалов: 1 — образец; 2 — точечные опоры; 3 — металлическая подложка; 4 — электромеханическое ударное устройство; 5 — коммутационное реле; 6 — источник питания; 7, 9 — измерительные датчики; 8, 10 — компенсационные датчики; 11, 12 — дифференциальные усилители; 13 — многофункциональная плата ввода-вывода; 14 — компьютер; 15 — источник питания.

нечник ударного элемента изготовлены из стали. Для регистрации электрического отклика, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов, используются два дифференциальных электрических датчика, позволяющих производить регистрацию электрических сигналов с двух приемников, расположенных вблизи боковой и нижней поверхностей образца. Электрический приемник состоит из двух воспринимающих элементов в виде плоских металлических пластин. Одна из пластин является измерительной и размещается на расстоянии 2 mm от поверхности образца, а другая — компенсационная находится на расстоянии 40–50 mm от образца. Измерительная пластина воспринимает как полезный сигнал, так и электрический сигнал удаленной помехи, в то время как компенсационная пластина удалена от источника полезного сигнала и практически воспринимает только удаленную помеху, что позволяет на выходе дифференциального датчика существенно уменьшить уровень дальней помехи и повысить соотношение сигнал-помеха. Сигналы с электрических приемников поступают на входы предварительных усилителей и регистрируются с помощью многофункциональной платы ввода-вывода „NI PCI-6251“, позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала и быстрое фурье-преобразование. В используемом измерительном комплексе предусмотрена возможность регистрации момента удара и его длительности. Для этого на металлическую подложку 3 подается потенциал (200 mV) с источника питания через сопротивление  $R_2$ , и это же напряжение поступает на один из входов платы ввода-вывода. При соприкосновении заземленного ударного элемента с подложкой сопротивление  $R_2$  закорачивается, напряжение падает до нуля и регистрируется платой ввода-вывода. Затем через определенное время, равное длительности удара, происходит отскок ударного элемента, и напряжение восстанавливается до первоначального уровня.

Доказательством того, что значительную роль в генерировании электрического сигнала играют пьезоэлектрические включения, даже при случайном расположении пьезоэлектрических осей относительно направления удара и приемника электрического сигнала, являются результаты сравнения электрических сигналов из моделей, содержащих различный наполнитель. Были изготовлены две модели на основе цементного вяжущего, в одну из которых было помещено растолченное оконное стекло  $M1$ , а в другую  $M2$  такая же концентрация кварцесодержащего песка. Соотношение наполнителя (стекла или песка) к цементу составляло 1 : 3. Причем размер фракции того и другого мелкого наполнителя был одинаковым и достигался путем просеивания.

Основными источниками механоэлектрических преобразований в модели  $M1$  являются двойные электрические слои, расположенные на границе цементной матрицы и стекла, а в модели  $M2$  наряду с двойными электрическими слоями на границе цемента и песка существует составляющая электрического отклика,

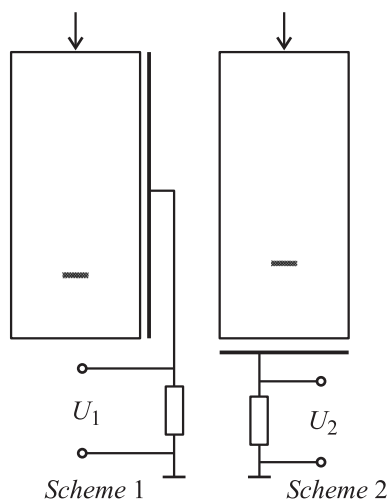
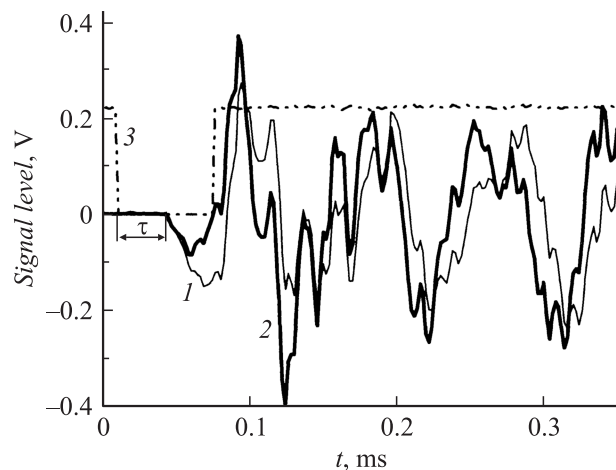


**Рис. 2.** Спектральные характеристики электрических сигналов из цементных образцов с различным наполнителем: *a* — толченное стекло, *b* — речной песок.

связанная с пьезоэлектрическим эффектом. На рис. 2 приведены спектральные характеристики электрических сигналов из данных моделей, из которого видно, что электрический сигнал из модели  $M1$  более чем на порядок меньше сигнала из модели  $M2$ . Суммарная спектральная плотность энергии электрического сигнала модели  $M2$  на 2.5 порядка больше по сравнению с моделью  $M1$ . Следовательно, составляющая, связанная с пьезоэлектрическим эффектом, значительно преобладает над составляющей, связанной с возбуждением двойных электрических слоев, на границе матрицы и наполнителя.

На начальном этапе были проведены исследования на моделях, состоящих из гипсовой матрицы и включений в виде пьезоэлектрического элемента из ЦТС керамики MM1 и слоя песка MM2. Образцы имели размер  $50 \times 50 \times 100$  mm. Слой песка формировался следующим образом. Был изготовлен образец из гипса, затем в боковой поверхности была высверлена полость размером  $3 \times 30$  mm и глубиной 30 mm. В эту полость насыпался песок и заливался жидкий гипсовый раствор.

При проведении испытаний образец устанавливался малой плоскостью ( $50 \times 50$  mm) на точечные опоры, а ударное устройство закреплялось в ячейке с помощью



**Рис. 3.** Электрические сигналы из модели ММ1, зарегистрированные с помощью нижнего и бокового электрических датчиков и характеристика удара. (1 — scheme 1, 2 — scheme 2, 3 — характеристика удара,  $\tau$  — задержка в появлении сигналов относительно момента удара).

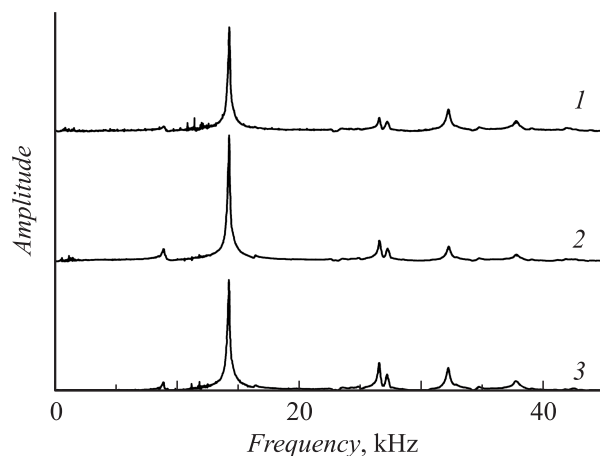
специальных зажимов на расстоянии 3 mm от верхней поверхности образца. В такой геометрии эксперимента затухание акустических волн, формирующихся в образце при его ударном возбуждении, определяется только характеристиками самого образца. Одновременно с электрическим откликом измерялась характеристика удара.

На рис. 3 приведен начальный участок электрических сигналов, зарегистрированных с помощью нижнего (scheme 1) и бокового (scheme 2) приемников, и ударная характеристика 3. В данном случае пьезоэлектрический элемент располагался на расстоянии 80 mm от поверхности, по которой производился удар.

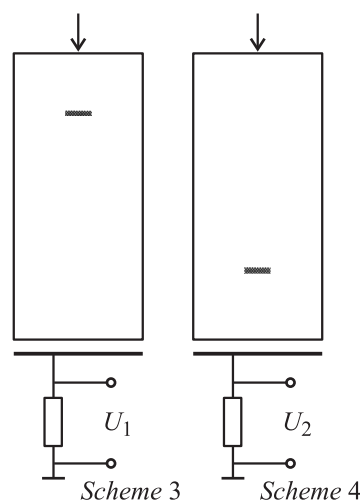
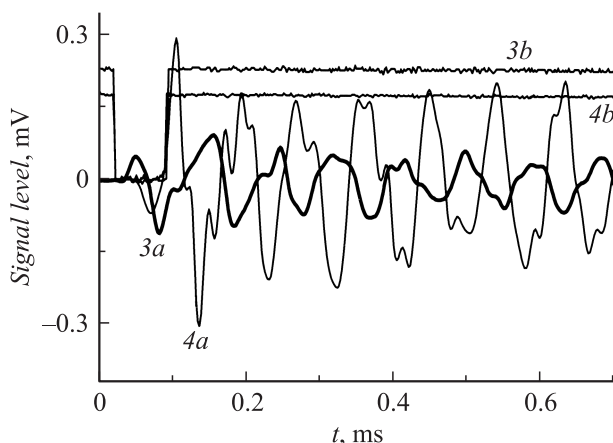
Как видно из рисунка, электрические сигналы на нижнем и боковом приемниках возникают одновременно в тот момент, когда акустическая волна доходит до пьезоэлектрического элемента. Задержка в появлении сигнала относительно момента удара ( $\tau$ ) составляет  $34 \mu\text{s}$ , что соответствует времени, рассчитанному из скорости

звука и расстояния от точки удара до пьезоэлектрического элемента.

По форме электрические сигналы близки, о чем свидетельствуют спектральные характеристики электри-



**Рис. 4.** Спектры электрических сигналов с нижнего (1) и бокового (2) электрических датчиков и с пьезоэлектрического датчика.



**Рис. 5.** Электрический сигнал (3a) и ударная характеристика (3b) — scheme 3 и соответственно (4a), (4b) — scheme 4 из модели ММ1.

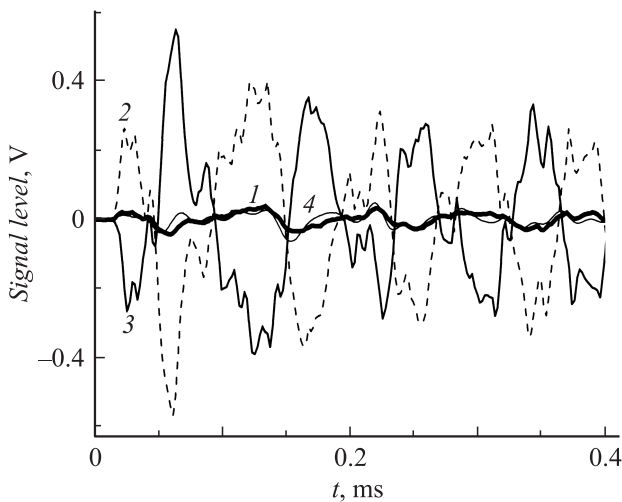
ческих сигналов с нижнего и бокового датчиков (рис. 4, кривые 1,2). Кроме того, спектральные характеристики электрических сигналов очень близки со спектром акустических колебаний самого внутреннего пьезоэлектрического элемента, с обкладок которого снимался сигнал (рис. 4, кривая 3).

Следовательно, в модели с единичным пьезоэлектрическим элементом спектральные характеристики электрического сигнала полностью определяются деформацией пьезоэлектрического элемента акустическими волнами, формирующимися в образце при его ударном возбуждении.

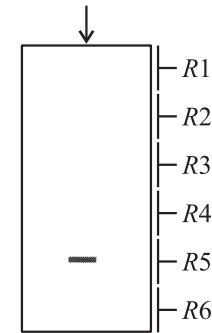
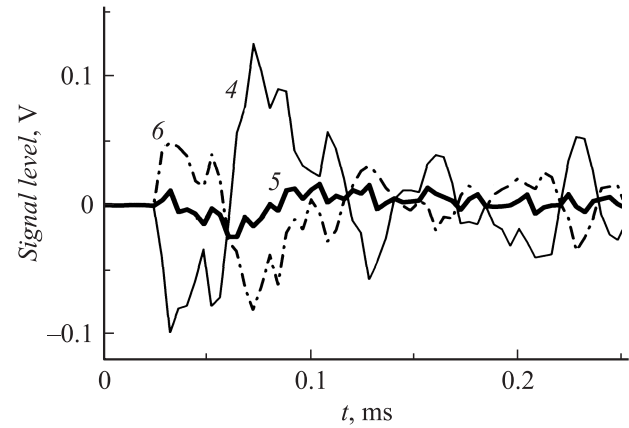
Рассмотрим более подробно работу пьезоэлектрического источника механоэлектрических преобразований. На рис. 5 приведены результаты сравнения электрических сигналов, зарегистрированных с помощью нижнего электрического датчика, при ударе по одной (scheme 3) и другой (scheme 4) сторонам образца. На рисунке номера кривых, под которыми фигурируют электрические сигналы и ударные характеристики, соответствуют номеру схемы измерения.

Приведение этих двух электрических сигналов в один график проведено путем совмещения их ударных сигналов. Аналогичным образом осуществлялось сравнение всех приведенных ниже сигналов. Для упрощения картин на последующих графиках ударные сигналы не приводятся.

Как видно из рис. 5, начало электрических сигналов при ударе по одной и по другой сторонам образца (рис. 5, кривые 3а и 4а) сдвинуто по времени, и сигналы находятся в целом в противофазе, кроме того, они значительно различаются по величине. Причем электрический сигнал больше, когда источник находится на расстоянии 20 мм от приемника по сравнению со случаем,



**Рис. 6.** Электрические сигналы из модели ММ1, зарегистрированные с помощью датчика, расположенного параллельно нижней поверхности образца. 1 — без заземления обкладок пьезоэлектрического элемента, 2 — заземлена одна сторона пьезоэлектрического элемента, 3 — заземлена противоположная сторона пьезоэлектрического элемента, 4 — сумма зависимостей 2 и 3.



Scheme 5

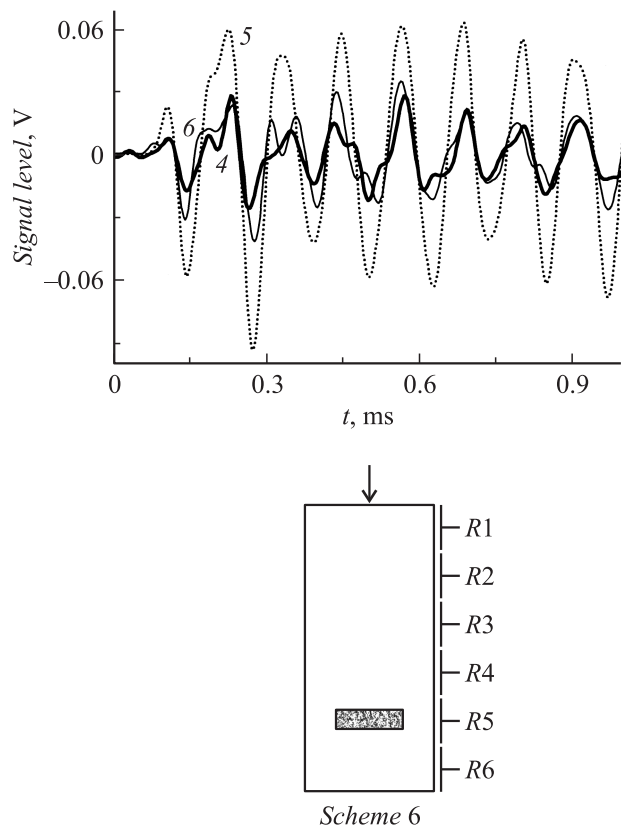
**Рис. 7.** Электрические сигналы из модели М1, зарегистрированные с помощью секционного датчика. (Цифрами у кривых обозначены номера датчиков).

когда источник находится от него на расстоянии 80 мм. Следовательно, величина сигнала уменьшается с увеличением глубины расположения источника относительно приемного электрического датчика.

Поочередное заземление одной или другой поверхности пьезоэлектрического элемента приводит к изменению полярности электрического сигнала (рис. 6), регистрируемого электрическим приемником, расположенным перпендикулярно направлению удара и параллельно обкладкам пьезоэлектрического элемента.

При заземлении одной либо другой обкладки пьезоэлектрического элемента сигнал значительно возрастает по сравнению со случаем, когда пьезоэлектрический элемент не заземлен. При сложении двух сигналов с заземленной одной 2 и другой 3 сторонами пьезоэлектрического элемента в результате получаем сигнал 4, который практически совпадает с сигналом, регистрируемым из образца без заземления обкладок пьезоэлектрического элемента 1. Аналогичным образом ведет себя сигнал и при измерении со стороны, перпендикулярной пьезоэлектрическому элементу. Следовательно, электрический сигнал является разностным сигналом от двух противоположно заряженных поверхностей пьезоэлектрического элемента.

Были проведены испытания этого образца с использованием секционного датчика, который представля-



**Рис. 8.** Электрические сигналы из модели M2, зарегистрированные с помощью секционного датчика. (Цифрами у кривых обозначены номера датчиков).

ет собой пластину фольгированного текстолита размером  $50 \times 100$  mm, разделенную на шесть приемников размером  $15 \times 50$  mm, который располагается на расстоянии 2 mm от боковой поверхности образца. Расположение отдельных электрических приемников (R) секционного датчика относительно пьезоэлектрического источника приведено на рис. 7 (scheme 5). На рис. 7 также приведены начальные участки электрических сигналов, зарегистрированных приемниками R4, R5 и R6.

Как видно из рисунка, минимальная величина электрического сигнала регистрируется с помощью приемника R5, в зоне которого находится пьезоэлектрический элемент (кривая 5). Датчики, расположенные в ту или другую сторону от пьезоэлектрического элемента, регистрируют сигналы разной полярности и величины. При расположении датчика перпендикулярно плоскости пьезоэлектрического элемента также регистрируется разностный сигнал.

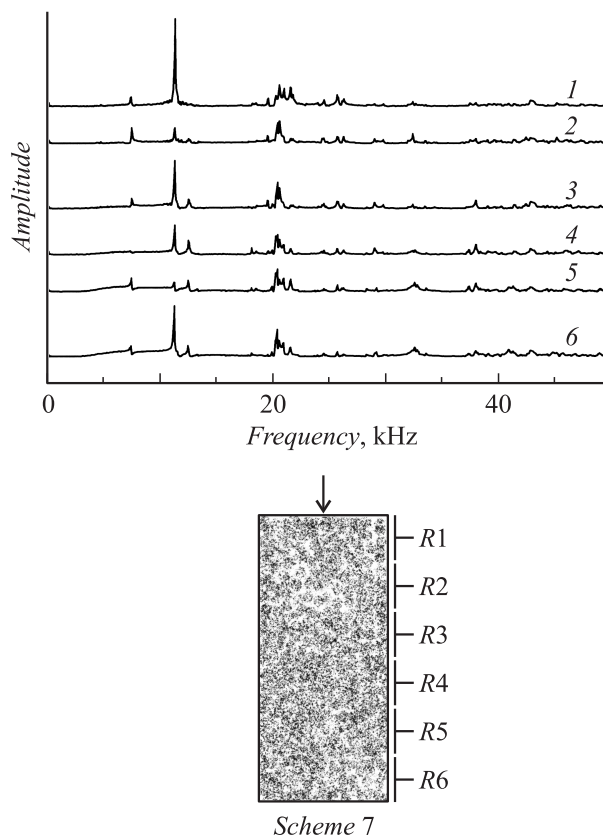
Теперь сравним результаты испытания модельного гипсового образца с включением в виде пьезоэлектрического элемента из ЦТС керамики (модель MM1) с результатами испытания образца со слоем песка (модель MM2), в котором имеется большое количество пьезокварцевых включений, со случайным образом ориентированными пьезоэлектрическими осями.

Электрический сигнал, регистрируемый секционным датчиком (scheme 6) с приемников, расположенных с разных сторон песчаного слоя, не смещается по фазе, и с приемника, расположенного вблизи области нахождения слоя песка, возрастает (рис. 8). Для упрощения картины приведены сигналы только с приемников 4–6.

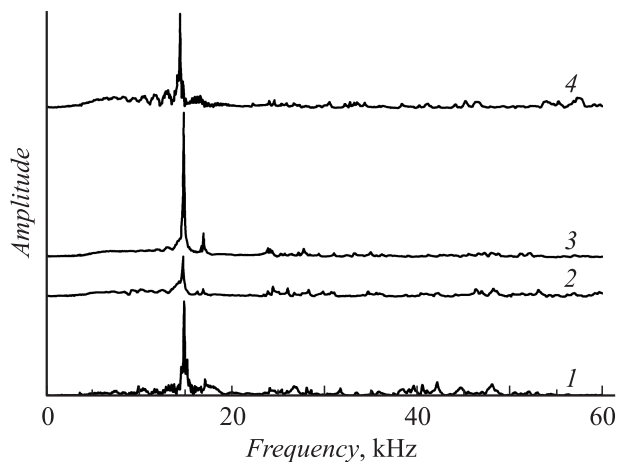
Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в слое песка нет преимущественного расположения пьезоэлектрических осей в рамках всего слоя ни в вертикальном, ни в горизонтальном направлениях. Скорее всего, имеются локальные участки с преимущественным направлением пьезоэлектрических осей. При деформации этих областей возникают электрические поля, имеющие различную величину и направление, а суммарное электрическое поле является результатом их векторного сложения.

Подтверждением этому служат результаты испытания гипсопесчаного образца (рис. 9), в котором кварцсодержащий песок равномерно распределен по всему объему образца, с использованием секционного электрического приемника (scheme 7).

В гипсопесчаных образцах ориентация пьезоэлектрических осей пьезокварца имеет случайный характер, и отдельные области образца могут иметь различную эффективность механоэлектрических преобразований за счет векторного сложения электрических полей от от-



**Рис. 9.** Спектры электрических сигналов из гипсопесчаного образца, зарегистрированные с помощью секционного датчика. (Цифрами у кривых обозначены номера приемников).



**Рис. 10.** Спектры электромагнитных сигналов из четырех идентичных образцов цементного раствора.

дельных пьезоэлектрических источников, расположенных в данной области.

Испытание нескольких образцов, имеющих одинаковое процентное содержание песка, показывает, что величина электрического сигнала из них имеет значительный разброс значений.

На рис. 10 приведены спектральные характеристики электрических сигналов из четырех идентичных образцов цементного раствора.

Из рисунка видно, что спектральный состав электрических сигналов не претерпевает значительных изменений, в то время как величина главного спектрального максимума изменяется значительно, порою в несколько раз.

Следовательно, использование для материалов, содержащих пьезоэлектрические включения, в качестве критерия оценки их структурных и механических характеристик амплитуды электрического отклика на ударное возбуждение может давать значительные погрешности. Поэтому разработка неразрушающих механоэлектрических методов контроля гетерогенных материалов, содержащих пьезоэлектрические включения, должна быть основана на поиске амплитудно-независимых критериев.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Федерального агентства по образованию в рамках реализации АВИЦП развитие научного потенциала высшей школы (№ 2.1.2./1697).

## Список литературы

- [1] Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. // Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 27–34.
- [2] Фурса Т.В., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 4. С. 129–132.
- [3] Суржиков А.П., Фурса Т.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 71–76.
- [4] Суржиков А.П., Фурса Т.В. Патент РФ № 2190204. МПК7.G 01.N 3/30.