

УДК 539.4: 537.5

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ И МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ  
ТРЕЩИН В БЕТОНАХ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ  
МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов\*, Д.Д. Данн

Томский политехнический университет

\*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г.  
Томск

E-mail: DDDann@tpu.ru

**Фурса Татьяна Викторовна**,  
д-р техн. наук, ведущий  
научный сотрудник  
Проблемной научно-  
исследовательскойлаборатории электроники,  
диэлектриков и  
полупроводников Института  
неразрушающего контроля  
ТПУ.

E-mail: fursa@tpu.ru

Область научных интересов:  
неразрушающий контроль.**Осипов Константин  
Юрьевич**, канд. техн. наук,  
научный сотрудник  
Института оптики атмосферы  
им. В.Е. Зуева СО РАН, г.  
Томск.

E-mail: osipov@iao.ru

Область научных интересов:  
неразрушающий контроль.**Данн Денис Дмитриевич**,  
аспирант Проблемной научно-  
исследовательскойлаборатории электроники,  
диэлектриков и  
полупроводников Института  
неразрушающего контроля  
ТПУ.

E-mail: dddann@tpu.ru

Область научных интересов:  
неразрушающий контроль.

На моделях строительных материалов показано, что увеличение в них искусственных трещин приводит к трансформации спектральных характеристик электрических откликов на импульсное механическое возбуждение. Зарегистрированы характерные отличия в спектрах электрических сигналов при перемещении приемного датчика в трещиноватую зону образца. В качестве критерия оценки общей длины трещин в бетоне может быть использован максимальный коэффициент корреляции спектра электрического сигнала из дефектного материала по сравнению с бездефектным.

**Ключевые слова:**

Бетон, неразрушающий контроль, трещина, механоэлектрические преобразования.

Конструкции из композиционных строительных материалов, такие как бетоны и железобетоны, часто эксплуатируются под действием значительных механических нагрузок в условиях сезонных колебаний температуры, что приводит к появлению дефектности в виде трещин, и является одной из главных причин разрушения таких материалов. В настоящее время нет надежных методов определения происходящих в материале нарушений в процессе эксплуатации наружных строительных конструкций. Для решения этой задачи может быть использо-

вано явление механоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических материалах [1–8]. Проведенные исследования показывают, что параметры электрического отклика на упругое ударное возбуждение зависят от структурных и механических характеристик образцов бетона [9–15].

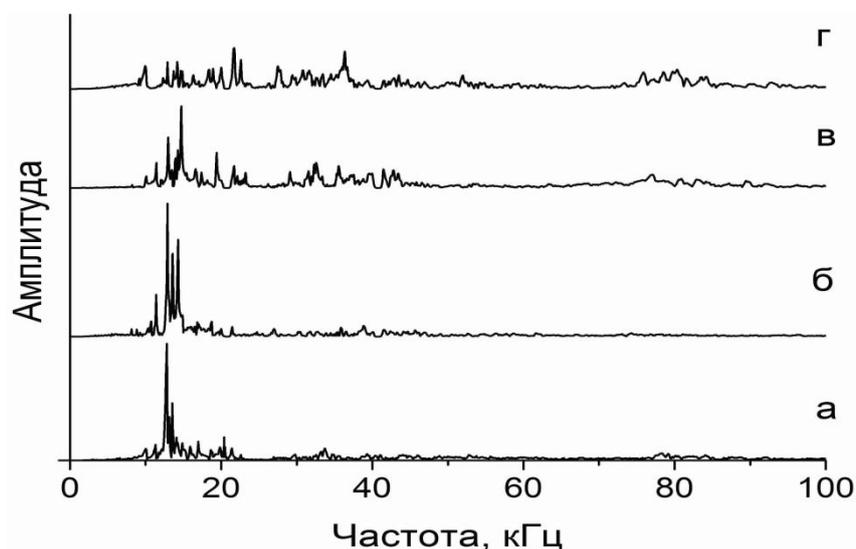
Исследования были выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение образцов и регистрацию электрических откликов. Импульсное механическое возбуждение образцов осуществляли электромеханическим ударным устройством, позволяющим производить однократный удар. Для регистрации электрической составляющей переменного электромагнитного поля, возникающего в гетерогенных диэлектрических материалах при импульсном механическом возбуждении, использовался дифференциальный электрический датчик. Датчик имеет две приемные металлические пластины, одна из которых (измерительная) размещается на расстоянии 2 мм от поверхности образца и воспринимает как полезный сигнал, так и помеху, а другая (компенсационная) находится на расстоянии 4...5 см от образца и принимает помеховую составляющую, за счет чего на выходе дифференциального датчика выделяется полезная составляющая сигнала. Сигнал с электрического датчика регистрировался с помощью многофункциональной платы ввода–

вывода «NI PCI-6251»), позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала и быстрое Фурье-преобразование.

Искусственные трещины различной концентрации были созданы путем введения в форму с жидким цементно-песчаным раствором полиэтиленовых пластин размером 20×20×1 мм на 3 часа, после чего в образцах оставались полости, моделирующие трещины соответствующего размера. Трещины были различным образом ориентированы относительно друг друга. Из одного и того же цементно-песчаного раствора были изготовлены модели с 5, 10 и 30 трещинами и контрольный бездефектный образец.

После полного формирования структуры цементно-песчаных образцов размером 100×100×100 мм были проведены измерения электрического отклика на ударное возбуждение этих моделей.

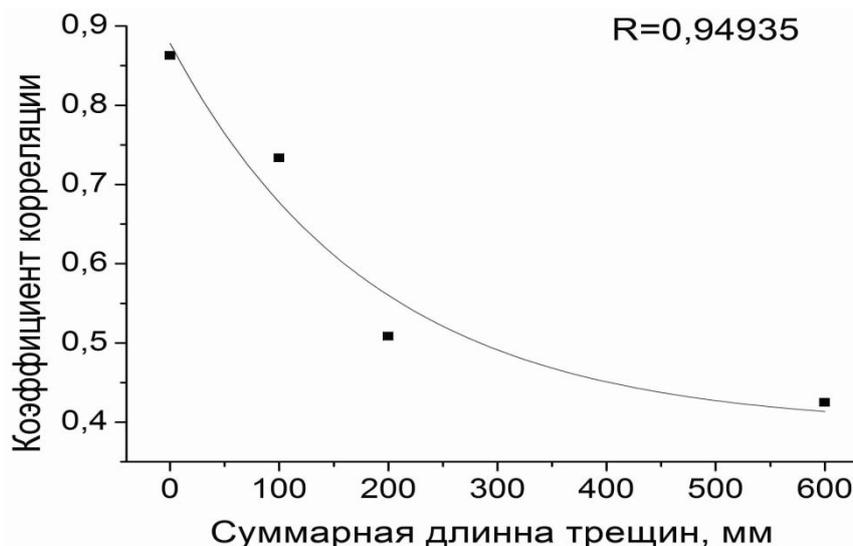
Распространение внутри материала при его ударном возбуждении упругих волн приводит к появлению регистрируемого в ходе экспериментов электрического сигнала, основным источником которого в цементно-песчаных образцах является пьезокварц, содержащийся в речном песке. Наличие трещин в материале приводит к трансформации волновой картины акустических колебаний [16]. В соответствии с этим при увеличении концентрации трещин электрический сигнал также в значительной степени трансформируется, что наиболее наглядно отражается в изменении его спектральных характеристик приведенных на рис. 1.



**Рис. 1.** Спектры электрических сигналов из цементно-песчаных образцов с искусственными трещинами: а) 0; б) 5; в) 10; г) 30 трещин

На рис. 1 наблюдается уменьшение величины основного спектрального максимума и появление более высокочастотных составляющих в спектре с увеличением суммарной длины трещин. Для количественной оценки изменения формы амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов был использован корреляционный анализ с эталоном. В качестве математического эталона электромагнитного сигнала из бездефектного образца использовались свободно затухающие гармонические колебания. На основании приведенных спектров можно говорить о том, что искусственно созданная трещиноватость приводит к изменениям в электрическом сигнале, оцениваемым количественно в виде зависимости коэффициента корреляции от суммарной длины трещин, и описывается экспонентой вида:

$K = 0,4 + 0,48 * e^{\left(-\frac{L}{186,89}\right)}$  с коэффициентом корреляции 0,95, которая приведена на рис. 2.

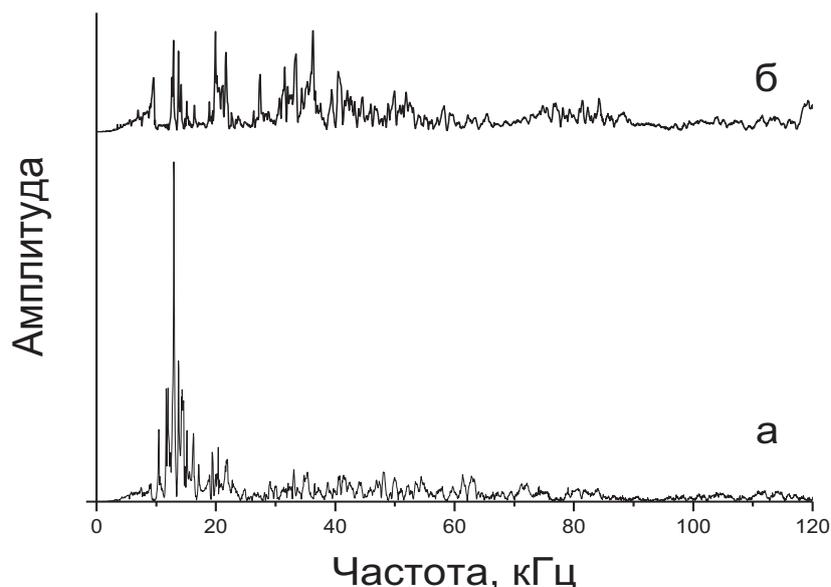


**Рис. 2.** Зависимость коэффициента корреляции спектра электрического сигнала от суммарной длины трещин в цементно-песчаных образцах

Из рис. 2 видно, что коэффициент корреляции последовательно уменьшается при увеличении суммарной длины трещин, что показывает возможность определения концентрации трещин в материале по изменению максимального коэффициента взаимной корреляции спектров сигналов дефектного и бездефектного образцов.

На этих же образцах было проведено исследование влияния на параметры электрического сигнала местоположения дефектной области относительно приемного датчика. Для этого образец с искусственными дефектами располагался таким образом, чтобы дефектная поверхность была боковой. Удар производился по центру верхней поверхности образца, приемный датчик (размером 25×25 мм) располагался параллельно верхней поверхности на расстоянии 20 мм от точки удара.

Сначала датчик располагался вблизи бездефектной, а затем дефектной боковой поверхности образца. Наиболее ярко различия в спектрах электрических сигналов из дефектной и бездефектной области выражены для образца с 30 трещинами (рис. 3).



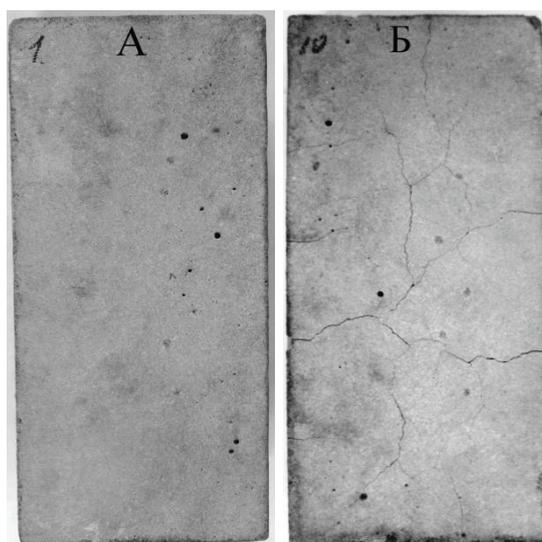
**Рис. 3.** Спектры электрического сигнала из а) бездефектной и б) дефектной области цементно-песчаного образца

Из рис. 3 видно, что удаление приемного датчика от дефектной области приводит к тому, что спектр электрического сигнала становится близким к спектру сигнала из бездефектного образца. Полученные результаты свидетельствуют о возможности разработки метода определения дефектной области в бетонных материалах по параметрам электрического отклика на ударное возбуждение.

Для сравнения полученных закономерностей на искусственных трещинах с трещинами, образовавшимися естественным путем, был проведен эксперимент на партии образцов, которые подвергались разному количеству циклов замораживания–оттаивания.

Для этого партия образцов тяжелого бетона, которая состояла из 10 штук, была разбита на 5 групп. Одна группа из партии (контрольная) не подвергалась испытаниям, а хранилась во влажном состоянии. Каждая из последующих 4 групп была подвергнута разному количеству циклов замораживания–оттаивания (5, 10, 15, 20). Замораживание производилось в условиях климатической камеры, а оттаивание – в универсальной камере при температуре  $(20 \pm 5)$  °С и влажности 95 %. С целью ускорения процесса трещинообразования температуру замораживания снижали до  $-45$  °С, а длительность циклов замораживания и оттаивания сокращали до 2-х часов. Уже после 7–8 циклов на поверхности образцов появлялись отдельные видимые трещины. Так как приповерхностные слои исходно имеют значительно менее прочную структуру, то и развитие трещин в первую очередь должно начинаться с приповерхностных слоев. Поэтому общая длина поверхностных трещин может служить опосредованной характеристикой степени дефектности (трещиноватости) образцов, возникшей в результате их циклического замораживания–оттаивания.

На рис. 4 приведены фотографии поверхности двух образцов бетона: а) контрольного и б) прошедшего 20 циклов замораживания–оттаивания.

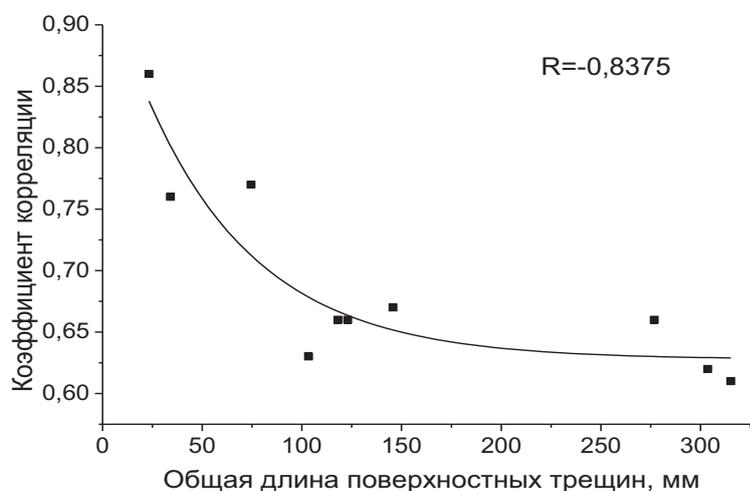


**Рис. 4.** Фотографии контрольного образца (а) и (б) после 20 циклов замораживания–оттаивания

На основе фотографий с помощью программы NI Vision Assistant было осуществлено измерение общей длины поверхностных трещин для образцов, прошедших различное количество циклов знакопеременного температурного воздействия. Программа позволяет провести специальную обработку изображений, чтобы трещины стали видны достаточно хорошо. Далее в программе с помощью маркера выделяются трещины, и становится возможным легко определить их длину. В качестве результата в программе выдается общая длина отмеченных пользователем трещин.

Были проведены измерения электрического сигнала при упругом ударном возбуждении из партии образцов тяжелого бетона, прошедших различное количество циклов замораживания–оттаивания, электрических сигналов, рассчитаны их спектральные характеристики и максимальные коэффициенты корреляции полученных спектров со спектром сигнала из контрольного образца.

На рис. 5 приведена зависимость максимального коэффициента взаимной корреляции между спектрами электрических сигналов дефектного и контрольного образца от общей длины трещин на одной из поверхностей образцов тяжелого бетона.



**Рис. 5.** Зависимость максимального коэффициента корреляции спектра электрического сигнала от общей длины трещин на поверхности тяжелого бетона

Как видно из рис. 5, наблюдается уменьшение коэффициента корреляции с увеличением общей длины трещин. Эта зависимость описывается экспонентой  $K = 0,63 + 0,32 \cdot e^{\left(\frac{L}{56,26}\right)}$  с коэффициентом корреляции 0,84. Полученные экспериментальные результаты дают основание предложить в качестве критерия оценки степени дефектности (трещиноватости) максимальный коэффициент взаимной корреляции между спектрами электрических сигналов дефектного и контрольного образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурса Т.В. О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – № 7. – С. 53–56.
2. Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. К вопросу о механизме механоэлектрических преобразований в бетонах // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – № 1. – С. 57–61.
3. Суржиков А.П., Фурса Т.В. Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. – № 4. – С. 71–76.
4. Фурса Т.В., Савельев А.В., Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи параметров электромагнитного отклика из диэлектрических материалов с характеристиками ударного возбуждения // ЖТФ. – 2003. – Т. 73. – № 11. – С. 59–63.
5. Фурса Т.В., Данн Д.Д. Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения // ЖТФ. – 2011. – Т. 91. – № 8. – С. 53–58.
6. Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Механоэлектрические преобразования в композиционных диэлектрических материалах при комплексном термомеханическом возбуждении // Дефектоскопия. – 2003. – № 10. – С. 33–37.
7. Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Исследование механоэлектрических преобразований в цементно-песчаных образцах в процессе циклического знакопеременного температурного воздействия // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – № 19. – С. 61–68.
8. Фурса Т.В. Исследование механоэлектрических преобразований в образцах цементного раствора в процессе трещинообразования, вызванного циклическим замораживанием–оттаиванием // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 8. – С. 1–6.

9. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Гольд Р.М. Электромагнитный способ определения твердости материалов // Дефектоскопия. – 2001. – № 9. – С. 20–22.
10. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Романов Д.Б. Взаимосвязь качества контакта элементов композиционных материалов с параметрами электромагнитного отклика на ударное возбуждение // Дефектоскопия. – 2001. – № 9. – С. 23–26.
11. 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.
12. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов // Дефектоскопия. – 2007. – № 2. – С. 27–34.
13. 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.
14. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка метода контроля динамики изменения дефектности бетона под действием циклического замораживания–оттаивания на основе явления механоэлектрических преобразований // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 7. – С. 1–7.
15. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов: пат. 2453824 Рос. Федерация. МПК7 G 01 N 3/30 заявл. 22.02.11; опубл. 27.01.10, Бюл. № 3. – 11 с.
16. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – 280 с.

Поступила 19.06.2012 г.