

05.1;15.2

## **Разработка метода определения глубины открытой трещины в бетоне по параметрам затухания электрического отклика на упругое ударное возбуждение**

© К.Ю. Осипов, Т.В. Фурса

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

E-mail: osipov@iao.ru

Томский политехнический университет

E-mail: fursa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 21 июня 2012 г.

Проведены исследования характера затухания спектральных составляющих электрических откликов на упругое ударное возбуждение образца бетона с искусственными трещинами различной глубины. На основе анализа полученных результатов с использованием частотно-временного анализа предложен критерий определения глубины поверхностной трещины в бетоне.

Проблема дефектоскопии строительных сооружений из бетона, эксплуатирующихся в условиях, где к ним предъявляются высокие требования по надежности, имеет важное практическое значение. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований при импульсном механическом возбуждении диэлектрических материалов [1]. Проведенные ранее исследования по связи параметров электрического сигнала, возникающего при ударном возбуждении строительных материалов с их структурными и механическими характеристиками [2], свидетельствуют о перспективности использования явления механоэлектрических преобразований для разработки неразрушающего метода контроля дефектности гетерогенных диэлектрических материалов.

Целью данной работы является поиск новых информационных параметров электрического отклика на упругое ударное возбуждение для определения глубины открытой трещины.

Глубина открытых трещин является очень важным параметром для железобетонных конструкций. Если внешние трещины достигают

арматуры, то влага, проникающая через них, приводит к коррозии арматуры и нарушению ее контакта с бетоном, а это влечет за собой разрушение железобетонной конструкции.

Исследования выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение материалов и регистрацию электрического сигнала. Импульсное механическое возбуждение образцов производится с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара. Для регистрации электрической составляющей переменного электромагнитного поля, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов, используется дифференциальный электрический датчик. Сигналы с электрического датчика регистрируются с помощью многофункциональной платы ввода-вывода „NI PCI-6251“, совмещенной с ЭВМ, позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала.

Исследования проводились на образце бетона размером  $100 \times 100 \times 100$  mm. Процедура исследования заключалась в следующем. Вначале было проведено испытание бездефектного образца, а затем по центру боковой грани на станке производился пропил. Увеличение пропила и испытание образца после каждого нового пропила позволило отследить характер изменения параметров электрического сигнала с увеличением глубины дефекта.

Для оценки рассеяния упругих волн на искусственном дефекте в виде пропила был использован методический подход, описанный в статьях [3,4], суть которого заключается в отслеживании характера изменения спектральной энергии упругих волн как функции времени. Под действием ударного возбуждения в гетерогенных диэлектрических материалах происходят механоэлектрические преобразования, и регистрируется электрический отклик. Электрический отклик является следствием деформации и смещения упругой волной, созданной ударным возбуждением, источников сигнала в материале. Основными источниками механоэлектрических преобразований в бетонах являются пьезоэлектрические включения [5], которые содержатся в песке и крупном заполнителе. Источники механоэлектрических преобразований равномерно распределены по объему бетона. Поэтому параметры электрического отклика связаны с характеристиками упругих волн и надежно отражают процессы их взаимодействия с внутренними структурными неоднородностями и дефектами.

Электрический сигнал отражает затухание энергии ( $E$ ) акустических колебаний в образце и описывается решением уравнения [4]:

$$\log(\langle E(r, t, f) \rangle) = C_0 - \log(Dt) - \frac{r^2}{4Dt} - \sigma t, \quad (1)$$

где  $C_0$  — константа, зависящая от энергии, введенной источником возбуждения;  $D$  — параметр, который характеризует структуру материала и зависит от плотности компонентов, составляющих бетон, их геометрии и среднего числа;  $r$  — расстояние от источника возбуждения;  $t$  — время;  $f$  — частота;  $\sigma$  — параметр затухания, характеризующий рассеяние упругой энергии на структурных неоднородностях и дефектах.

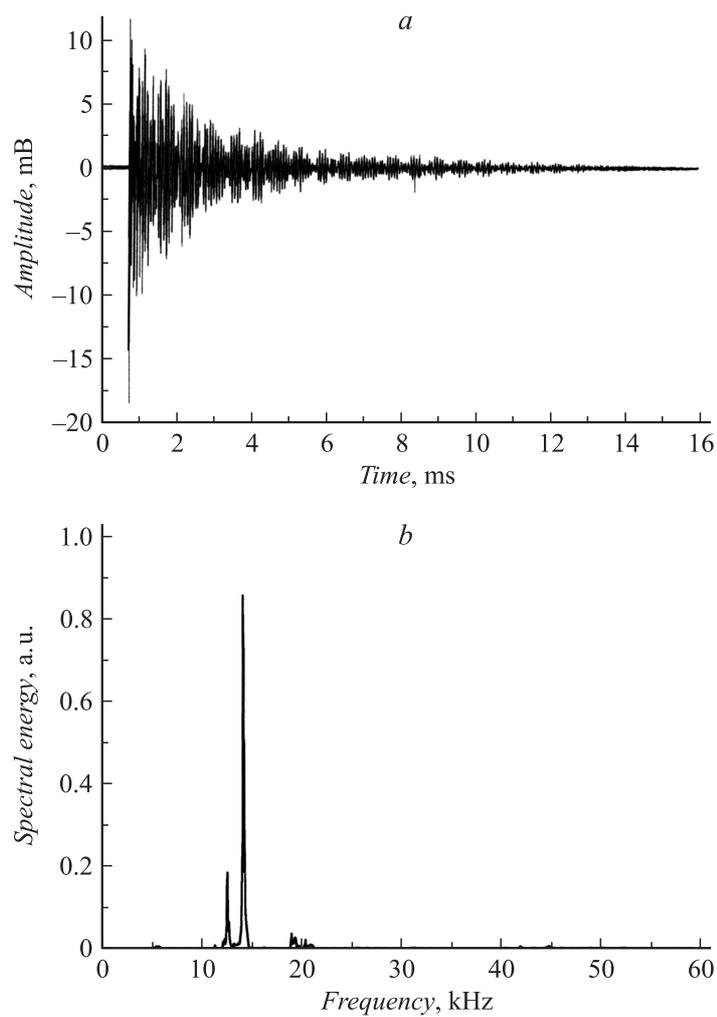
В нашем случае при увеличении глубины пропила будет изменяться только параметр затухания сигнала ( $\sigma, s^{-1}$ ), все остальные составляющие, входящие в формулу (1), изменяться не будут.

Для определения параметра затухания ( $\sigma$ ) электрического сигнала из образца мы использовали частотно-временной анализ, как это описано в работах [3,4].

На рис. 1 для примера приведен электрический отклик из бездефектного образца бетона и его энергетический спектр.

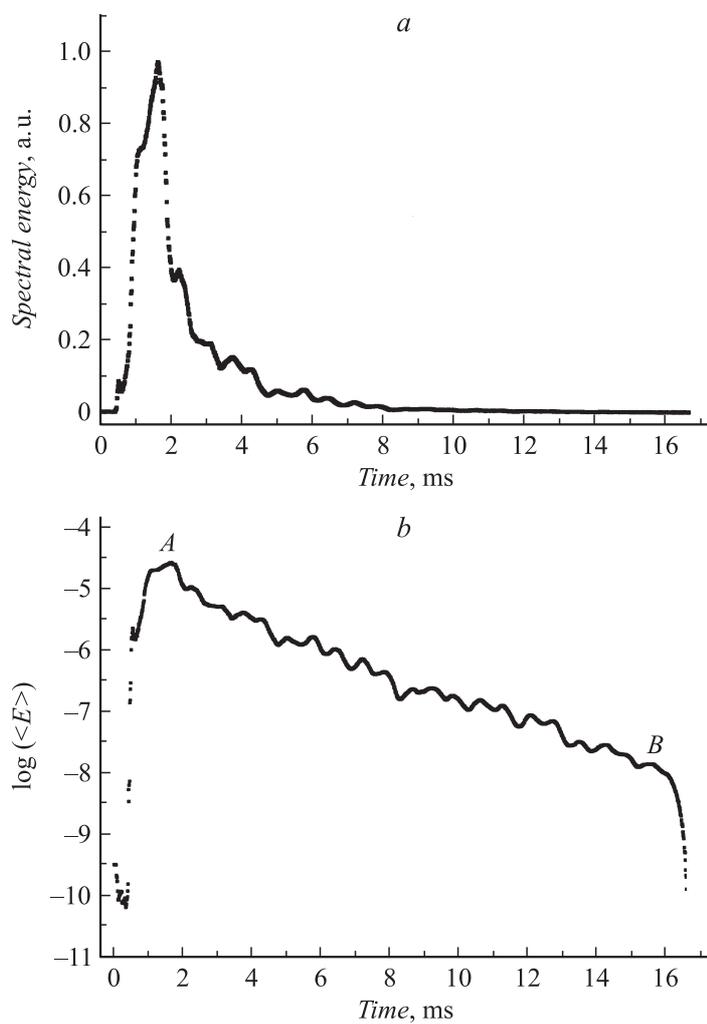
Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась следующим образом. С помощью специальной программы в среде программирования LabView производится выбор размера скользящего окна и задается шаг для смещения этого окна по временной реализации сигнала. В энергетическом спектре сигнала с помощью курсоров выбирается необходимый для анализа диапазон частот. Производится расчет суммарной спектральной энергии электрического отклика каждого окна в выбранном частотном диапазоне.

Такая методика позволяет отслеживать затухание спектральной энергии электрического отклика как функцию времени в области любого выбранного диапазона частот. На данном этапе для анализа был выбран частотный диапазон от 5 до 25 kHz, исходя из соображений, что в этой частотной области находится основная доля энергии электрических сигналов, возникающих в образце при используемом способе возбуждения. Размер скользящего окна составил  $1024 \mu s$  (при частоте оцифровки  $10^6$  Hz), и последовательное смещение этого окна по временной реализации производилось с шагом  $10 \mu s$ .

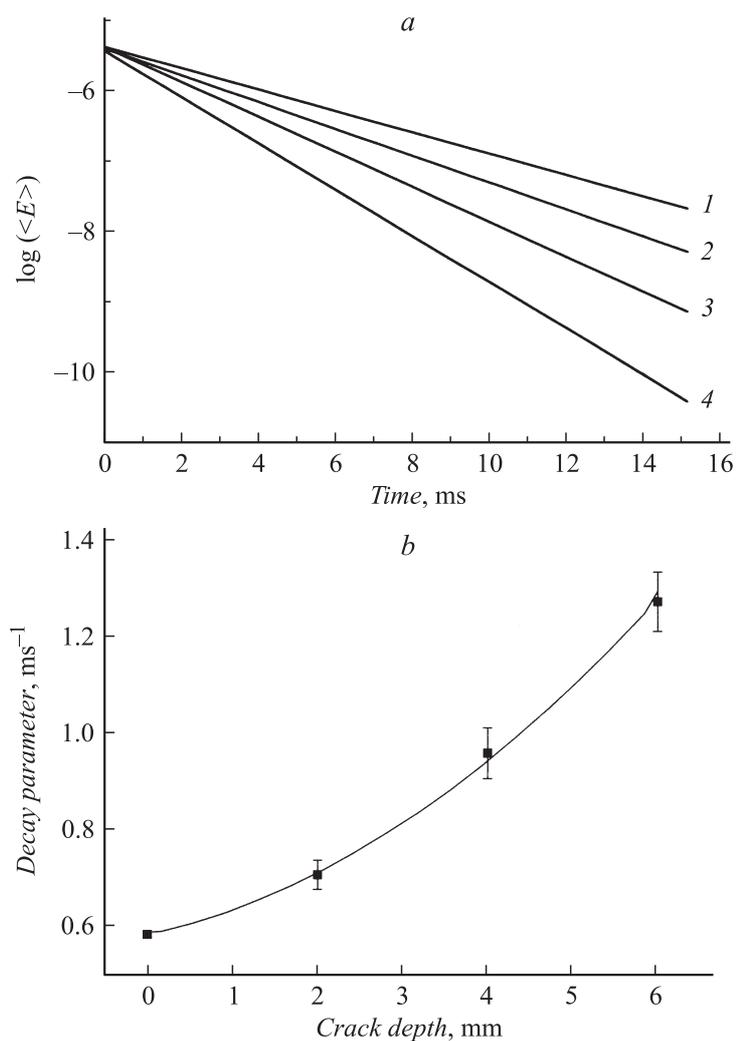


**Рис. 1.** Электрический отклик (*a*) из образца бетона и его энергетический спектр (*b*).

На рис. 2, *a* приведена типичная зависимость изменения суммарной спектральной энергии частотно-временного окна электрического откли-



**Рис. 2.** Изменение спектральной плотности энергии электрического сигнала (а) и ее логарифма (б) от времени для бездефектного образца бетона.



**Рис. 3.** Изменение характера затухания спектральной энергии электрического сигнала и параметра затухания в зависимости от глубины искусственной трещины в бетоне.

ка из образца бетона от времени. Чтобы количественно оценить затухание спектральной энергии электрического отклика, была использована логарифмическая зависимость (рис. 2, *b*).

Из рис. 2, *a* видно, что максимальное значение величины спектральной энергии наблюдается на  $1024 \mu\text{s}$  от начала сигнала, что соответствует размеру выбранного нами скользящего окна. Затем энергия убывает по зависимости, близкой к экспоненциальной, и выходит на шумовой уровень. Приведенная на рис. 2, *b* логарифмическая зависимость спектральной энергии от времени (на временном участке от *A* до *B*) имеет линейную зависимость, что хорошо совпадает с изменением параметра затухания ( $\sigma$ ) по формуле (1).

На рис. 3, *a* приведены аппроксимированные прямыми линиями (участки от точки *A* до точки *B*) логарифмические зависимости спектральной энергии электрического сигнала от времени для образца бетона: 1 — бездефектного, 2, 3, 4 — с пропилом 2, 4, 6 мм соответственно, а на рис. 3, *b* — зависимость параметра затухания от глубины дефекта (пропила).

Из рисунка видно, что с увеличением глубины искусственной поверхностной трещины происходит последовательное увеличение угла наклона аппроксимирующей прямой к оси времени. Изменение параметра затухания (тангенса угла наклона) от глубины дефекта хорошо описывается полиномом второго порядка.

Следовательно, по параметру затухания спектральной энергии электрического отклика на ударное возбуждение, определенному с использованием частотно-временного анализа, можно судить о глубине открытой трещины в бетоне.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“ (№ 7.1826.2011) и гранта РФФИ (№ 11-08-01102-а).

## Список литературы

- [1] Суржиков А.П., Фурса Т.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 4. С. 71–76.
- [2] Суржиков А.П., Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов: Пат. 2380675 РФ, МПК7 G 01 N 3/30.
- [3] Anugonda P., Wiehn J.S., Turner J.A. // Ultrasonics. 2001. N 39. P. 429–435.
- [4] Quiviger A., Payan C., Chaix J.-F., Garnier V., Salin J. // NDT & E International. 2012. N 45. P. 128–132.
- [5] Фурса Т.В., Дани Д.Д. // ЖТФ. 2011. Т. 91. В. 8. С. 53–58.