

05;12

Исследование влияния влажности на параметры механоэлектрических преобразований в бетонах

© Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, Д.Д. Данн

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

(Поступило в Редакцию 10 ноября 2009 г. В окончательной редакции 2 февраля 2010 г.)

Установлено, что увеличение влажности цементного раствора в диапазоне от 0 до 8% приводит к снижению основного спектрального максимума электрического отклика на ударное возбуждение по экспоненциальной зависимости в соответствии с изменением удельного электрического сопротивления. Предложена физическая модель механоэлектрических преобразований во влажном гетерогенном материале, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Широкое применение на практике гетерогенных материалов и их использование в различных конструкциях предъявляют к ним высокие требования по запасу прочности, который уменьшается под влиянием факторов внешней среды. Недостатки существующих методов определения текущей прочности материала конструкции, а следовательно и всей конструкции в целом, заставляют искать новые методы неразрушающего контроля механических характеристик гетерогенных материалов. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований.

На основе наших исследований разработан метод и запатентован способ неразрушающего контроля механической прочности изделий из твердых диэлектрических материалов, который позволяет определять прочность с точностью, превосходящей известные акустические методы [1]. Однако предложенный метод не учитывает влияния влажности материала на электрический отклик, по параметрам которого и определяется прочность. Для усовершенствования существующего алгоритма неразрушающего механоэлектрического способа определения прочности наружных строительных конструкций, влажность которых может претерпевать значительные изменения, требуется проведение исследований влияния влажности на параметры механоэлектрических преобразований.

Целью настоящей работы является исследование основных закономерностей влияния влажности гетерогенных диэлектрических материалов на параметры механоэлектрических преобразований при их импульсном механическом возбуждении.

Исследования были выполнены с помощью комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение образцов и регистрацию электрического отклика. Импульсное механическое возбуждение образцов производилось электромеханическим ударным устройством, позволяющим производить однократный, нормированный по силе удар. Удар производился по металлической подложке, которая помещалась на заданную область поверхности образца и была изготовлена из того

же материала, что и сферический наконечник ударного элемента. Такое механическое воздействие позволяло создавать импульс возбуждения длительностью порядка $70 \mu\text{s}$ и обеспечивать скорость ударяющего тела — бойка — до момента удара до 2.2 m/s . Для регистрации электрического отклика, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов, использовался дифференциальный электрический датчик, позволяющий регистрировать напряжение на входном сопротивлении при протекании через него тока проводимости, вызванного током смещения при механоэлектрических преобразованиях.

Электрический датчик состоит из двух воспринимающих элементов в виде плоских металлических пластин. Одна из пластин является измерительной (размещается вдоль боковой стороны образца на расстоянии 2 mm от нее), а другая — компенсационная — находится на расстоянии 3 cm от противоположной боковой стороны образца. Измерительная пластина воспринимает как полезный сигнал, так и 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 приемника существенно уменьшать уровень дальнейшей помехи и повысить соотношение сигнал–помеха. 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.

Исследования проводились на цементном растворе, который является пористой матрицей бетонов. Цементный раствор — это искусственный строительный материал, полученный в результате затвердевания растворной смеси, состоящей из вяжущего вещества (цемента), воды и мелкого заполнителя (песка). Так как влажность бетонов в основном определяется степенью заполнения водой капиллярных пор в цементной матрице, то результаты по влиянию влажности цементного раствора на параметры механоэлектрических преобразований

могут быть экстраполированы на тяжелые бетоны. Образцы представляли собой параллелепипеды размером $5 \times 5 \times 10$ см, удар производился в направлении большей плоскости.

Типичный электрический отклик из образцов цементного раствора и его спектральная характеристика приведены на рис. 1.

Электрический сигнал из пористых цементно-песчаных материалов является результатом возникновения тока смещения при движении зарядов двойных электрических слоев на границах неоднородностей (песка и пор) и поляризации пьезокварца, содержащегося в песке, под действием акустических волн, формирующихся в образце при его квазиупругом ударном возбуждении [2,3].

Частота основного спектрального максимума электрического отклика соответствует первой гармонике продольных акустических колебаний в направлении ударного возбуждения: $f = V/2L$, где V — скорость звука, L — длина образца в направлении удара.

Исследования влияния влажности образцов цементного раствора на параметры электрического отклика при их ударном возбуждении проводились следующим образом. Образцы помещались в воду на сутки, а затем

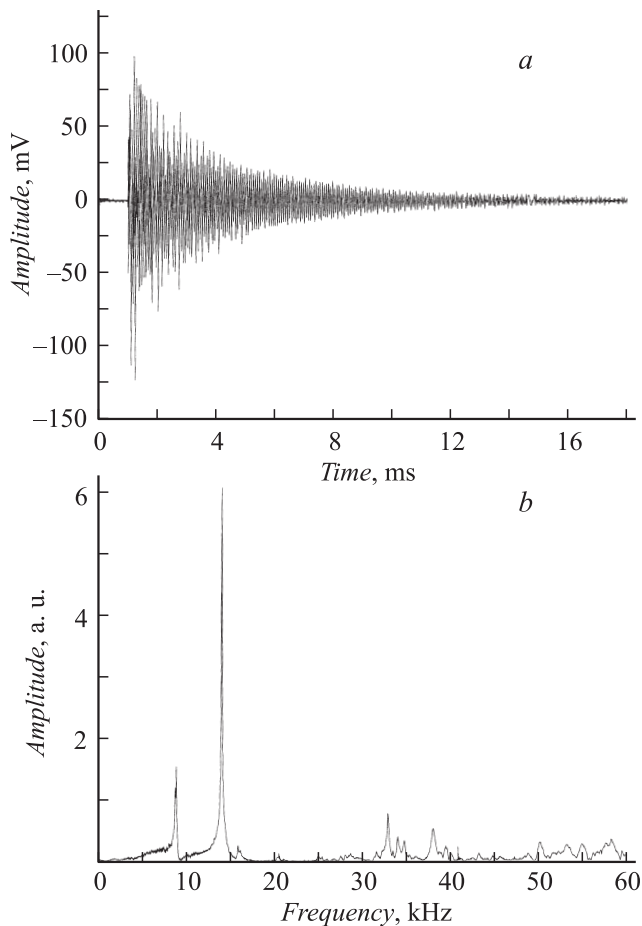


Рис. 1. Типичный электрический отклик из цементно-песчаных образцов и его спектральная характеристика: *a* — электрический сигнал, *b* — спектр электрического сигнала.

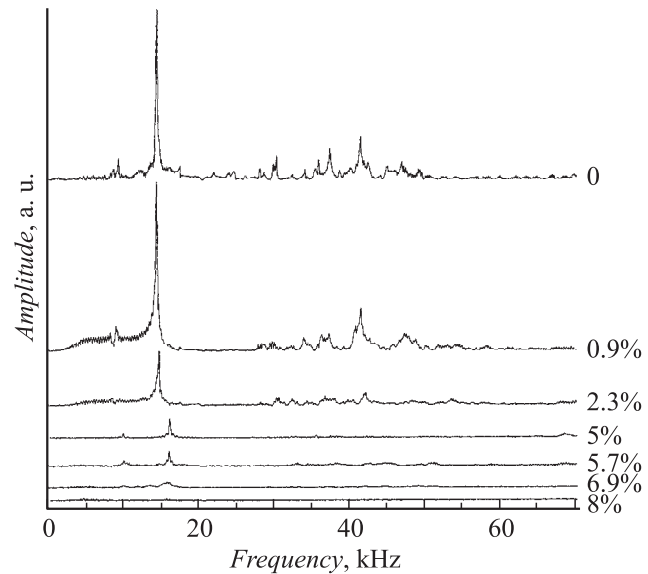


Рис. 2. Изменения амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов от влажности цементно-песчаного образца.

производилось исследование параметров электрического отклика в процессе их высушивания. Высушивание образца производилось сначала в комнатных условиях, а затем в сушильном шкафу при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ до постоянной массы по ГОСТ 12730.2-78. Постоянной считают массу пробы (образца), при которой результаты двух последовательных взвешиваний различаются не более чем на 0.1%. При этом время между взвешиваниями должно быть не менее 4 часов.

Было проведено испытание трех идентичных по составу образцов. Для повышения достоверности проводилось измерение электрического сигнала при каждом значении влажности по три раза с последующим усреднением результатов и определением доверительных интервалов. На рис. 2 приведено изменение спектральных характеристик типичного электрического сигнала в зависимости от влажности. Влажность определялась весовым методом.

Из рисунка видно, что уменьшение влажности в процессе высыхания песчаного бетона приводит к возрастанию электрического сигнала. Форма спектров электрического сигнала не претерпевает значительных изменений, за исключением того что происходит смещение спектра в область низких частот за счет изменения скорости звука в материале при испарении влаги из образца в процессе высыхания.

Характер изменения амплитуды основного максимума спектральной характеристики в зависимости от влажности приведен на рис. 3.

Изменение спектральной амплитуды (A) от процентного содержания воды ($W\%$) происходит нелинейно и достаточно хорошо описывается экспонентой вида: $A = 0.4 + 8.62 \exp(-0.78 W\%)$ с коэффициентом корреляции 0.99.

Влажность, %	7.9	7.3	6.4	5.4	4.3	3.2	2.3	1.5	0
$\rho, \Omega \cdot m$	$3.8 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^4$	$9.8 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^6$	$6.4 \cdot 10^6$

Процесс высушивания образцов происходит последовательно, начиная с поверхности в глубь материала. По мере высушивания начинают более эффективно работать источники электрического отклика, расположенные в объеме образца, из которого испарилась вода и где не происходит экранирования источников окружающим их проводящим цементным камнем. В результате этого при высушивании образцов происходит возрастание амплитуды электрического отклика.

Было проведено исследование характера изменения проводимости образцов цементного раствора в процессе их высушивания с использованием автоматического мостового измерителя иммитанса Е7-14.

Измерение электрического сопротивления производилось на образцах размером $50 \times 50 \times 6$ mm, которые были отпилены от образца, используемого для измерения электрического отклика на ударное возбуждение.

Влага в порах бетона является электролитом, так как содержит ионы растворимых продуктов (для бетона — это в основном ионы кальция и гидроксиды). В порах и капиллярах влага располагается у поверхности твердой фазы и, таким образом, ее свойства связаны в первую очередь с параметрами адсорбции и сформированного двойного электрического слоя. Толщина диффузной части двойного электрического слоя зависит только от концентрации раствора. При малом значении влажности имеются только связанные ионы и жестко ориентированные молекулы воды. Электропроводность такой системы минимальна. С увеличением влажности бетона увеличивается толщина адсорбированной пленки воды. Утолщение пленки связано с появлением диффузной части двойного слоя, увеличением средней подвижно-

сти ионов, что приводит к росту электропроводности. При дальнейшем увлажнении все в большей степени проявляется роль ионов, соответствующих свободному раствору. Доля ионов с пониженной подвижностью уменьшается, а электропроводность растет [4].

В таблице приведены значения удельного электрического сопротивления, измеренные в процессе высушивания образцов цементного раствора.

Как видно из таблицы, уменьшение влажности цементного раствора в диапазоне от 0 до 8% приводит к возрастанию удельного электрического сопротивления на четыре порядка.

На рис. 4 приведена зависимость удельного электрического сопротивления (ρ) от влажности цементного раствора. Из рисунка видно, что зависимость удельного электрического сопротивления (ρ) от влажности ($W\%$) описывается экспоненциальной зависимостью вида: $\rho = 3.3 \exp(-0.74 W\%) - 0.14$ с коэффициентом корреляции 0.98.

Порядок измеренных нами величин удельного электрического сопротивления и характер зависимости от влажности хорошо согласуются с известными литературными данными [4].

Уменьшение величины электрического отклика с возрастанием влажности и высокая корреляция с характером изменения удельного электрического сопротивления может являться следствием экранирования источников механоэлектрических преобразований окружающим их влажным цементным камнем, имеющим высокую проводимость. Кроме того, на параметры отклика должна оказывать влияние и диэлектрическая проницаемость образца, которая также изменяется от влажности.

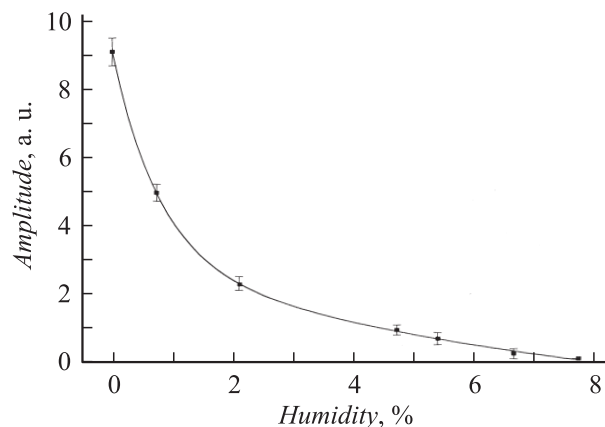


Рис. 3. Изменение амплитуды спектрального максимума электрического сигнала от влажности образца.

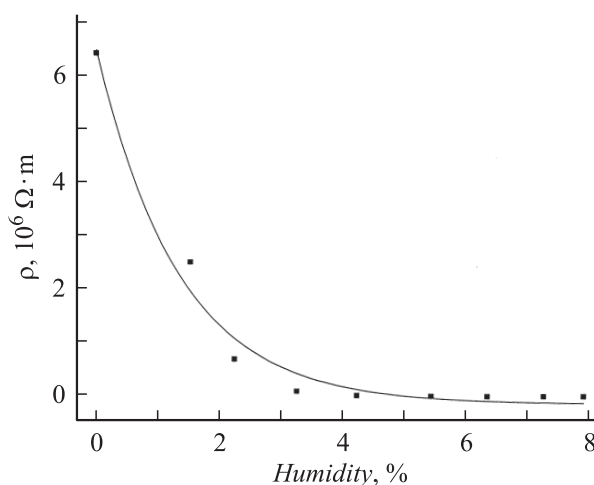


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления цементно-песчаного раствора от влажности.

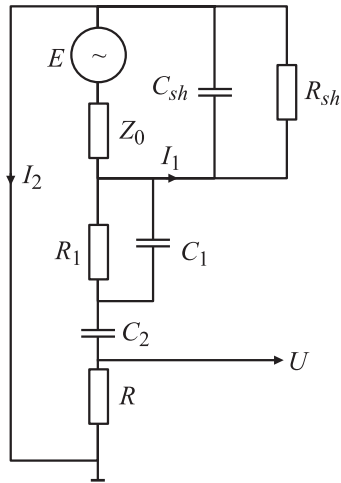


Рис. 5. Электрическая схема замещения.

Электрическая модель сигнала в условиях изменения проводимости и диэлектрической проницаемости материала, в котором происходят механоэлектрические преобразования, основана на следующих предположениях. С одной стороны, под действием акустической волны происходит появление заряда (на гранях пьезокварца) и движение этих зарядов и зарядов двойных электрических слоев, приводящее к изменению напряженности электрического поля, в результате чего возникает ток смещения, который течет по замкнутым орбитам. С другой стороны, наличие металлического проводника (поверхности приемника), соединенного через измерительное сопротивление с землей, в электрическом поле движущегося заряда приводит к изменению потока вектора индукции через поверхность пластины приемника. На основе этого в электрической схеме замещения сформированы два контура. Соотношения между токами в первом и втором контуре, очевидно, будут определяться электрическими свойствами среды. Повышение проводимости в области круговых токов приводит к возрастанию тока в первом контуре (I_1) и соответствующему уменьшению — во втором (I_2) и свидетельствует об экранировании источников механоэлектрических преобразований, находящихся во влажных зонах.

С учетом изложенного предлагается электрическая схема замещения отклика при механоэлектрическом преобразовании в образце (рис. 5) для качественного объяснения полученных закономерностей по изменению величины основного максимума амплитудно-частотной характеристики отклика влажных образцов.

Как видно из рис. 5, электрическая цепь состоит из двух электрических контуров. Один контур, включающий активное сопротивление R_{sh} и емкость C_{sh} , создающую реактивное $Z_{C_{sh}}$ сопротивление, охватывает источник и является шунтирующим по отношению к току сигнала, проходящего через измерительное сопротивление электрического датчика R . R_1 и C_1 — активное и емкостное сопротивляющее пространство

между источником сигнала внутри образца и поверхностью образца, напротив которой находится пластина емкостного датчика; C_2 — емкость между поверхностью образца и пластиной приемника; R — измерительное сопротивление; Z_0 представляет собой внутренний импеданс источника $E(t)$. Параметр $E(t)$ задается в виде $E(t) = E_0 \sin(2\pi ft)$, где f — частота основного максимума амплитудно-частотной характеристики сигнала при механоэлектрическом преобразовании.

Исходя из предложенной схемы был составлен алгоритм расчета, моделирующий полученные экспериментальные данные.

Расчет импедансов элементов электрических цепей производился с учетом полученных зависимостей электрической проводимости и диэлектрической проницаемости цементного раствора от влажности

$$Z_{sh}(W\%) = \frac{R_{sh}(W\%)}{1 + R_{sh}(W\%)j\omega C_{sh}(W\%)},$$

$$Z_1(W\%) = \frac{R_1(W\%)}{1 + R_1(W\%)j\omega C_1(W\%)},$$

Согласно схеме замещения, выражение для амплитуды сигнала $U(W\%)$ имеет следующий вид:

$$U(W\%) = \frac{EZ_{sh}(W\%)R}{Z_{sh}(W\%)Z_0 + (Z_0 + Z_1(W\%) + Z_2 + R)(Z_{sh}(W\%) + Z_0)},$$

где $Z_2 = 1/j\omega C_2$.

Полученная в результате расчета зависимость показана на рис. 6.

Из графиков видно, что формы экспериментальной и расчетной кривых близки друг к другу, что свидетельствует о хорошем соответствии модели в виде электрической схемы замещения физическим процессам при механоэлектрических преобразованиях во влажном цементном растворе.

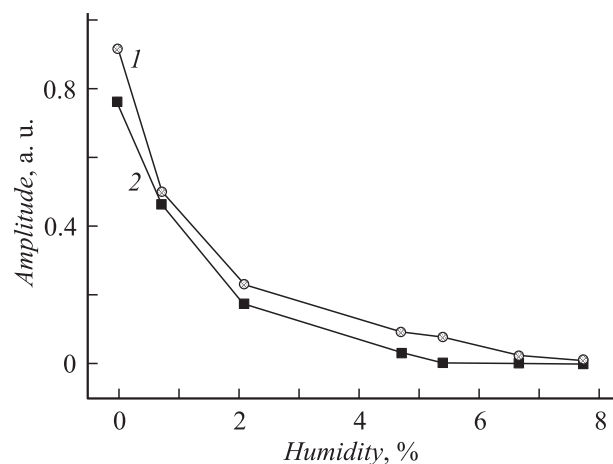


Рис. 6. Зависимость отклика из образца от влажности: 1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета.

Полученные результаты будут использованы при разработке нового неразрушающего механоэлектрического метода контроля прочности гетерогенных материалов, имеющих различную влажность.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Федерального агентства по образованию в рамках реализации АВЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“ (№ 2.1.2/1697).

Список литературы

- [1] Суржиков А.П., Фурса Т.В. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов. Пат. 2190204 РФ, МПК7 G 01 N 3/30.
- [2] Суржиков А.П., Фурса Т.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 71–76.
- [3] Хорсов Н.Н. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 2. С. 69–77.
- [4] Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона. М.: Энергия, 1980. 206 с.