

05;08;12

К вопросу о механизме механоэлектрических преобразований в бетонах

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

Томский политехнический университет,
634034 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 27 марта 2000 г.)

Установлена зависимость амплитудно-частотных характеристик электромагнитного отклика на ударное возбуждение бетонов от размеров и геометрии расположения в них включений. Предложена физическая модель источника сигнала и получены расчетные значения частотной характеристики отклика по электрической цепи замещения. Совпадение расчетных и экспериментальных результатов подтверждает правильность предложенного механизма механоэлектрических преобразований.

В работе [1] показано, что по параметрам электромагнитного отклика на ударное возбуждение можно осуществлять неразрушающий контроль прочности бетона. В качестве критерия контроля прочности используются амплитудно-частотные характеристики электромагнитного отклика. Кроме того, установлено [2], что источниками механоэлектрических преобразований в бетонах являются зоны адгезионного контакта цементной матрицы и заполнителя. Однако в некоторых случаях при проведении контроля по электромагнитному методу наблюдаются значительные погрешности в определении механической прочности. Это может быть связано с тем, что при ударном возбуждении бетонов регистрируется электромагнитный отклик, имеющий достаточно широкий спектр, а в качестве критерия используется частота основного максимума спектральной характеристики. В данной работе предпринята попытка оценки взаимосвязи спектральных характеристик электромагнитного отклика с параметрами внутренних источников.

Проведенные ранее исследования показали, что определяющую роль в генерировании электромагнитной эмиссии при ударном возбуждении бетонов играют внутренние источники [3]. Однако до настоящего времени неясно, каким образом этот источник работает и каков механизм механоэлектрических преобразований в композиционных материалах, состоящих из вяжущего и заполнителя. Если считать, что акустическая волна, формирующаяся при ударном возбуждении бетона, изменяет состояние двойного электрического слоя на границе цементной матрицы и заполнителя, то это должно приводить к появлению сигнала во внешней электрической цепи приемника за счет тока смещения. Спектральные характеристики электрического сигнала такого акустоэлектрического преобразования будут определяться геометрией расположения источника сигнала относительно точки удара и зоны приема, а также его размерами. В реальных бетонах имеется большое количество таких источников, которые распределены по объему образца случайным образом и интерпретация сигнала от такой сложной системы весьма затруднительна. Поэтому исследования проводились на модельных образцах, изго-

товленных на основе цементной матрицы, в которую помещались одиночные включения.

Исследования параметров электромагнитного отклика на ударное возбуждение материалов проводились с использованием прибора "Emission" [4]. Прибор позволяет производить ударное возбуждение объектов исследования и оцифровку сигналов электромагнитного отклика на это воздействие.

На рис. 1, *a* приведен типичный спектр электромагнитного отклика на ударное возбуждение модельного образца с единичным зерном гравия. Видно, что спектр сигнала достаточно неоднородный. Наличие большого количества спектральных полос в амплитудно-частотной характеристике электромагнитного отклика, по-видимому связано как с геометрией расположения различных граней включения по отношению к поверхностям образца, так и условиями формирования и прохождения через эти грани акустических волн. Спектральная характеристика электромагнитного отклика, регистрируемого при ударном возбуждении образца с плоским включением, имеет более бедный спектр с четкими резонансными максимумами (рис. 1, *b*). Увеличение количества включений, помещенных в модельный образец, приводит к увеличению числа спектральных максимумов в АЧХ электрического сигнала, возникающего при ударном возбуждении. В частности, на рис. 2 приведен спектр сигнала из образца цементного камня с двумя плоскими металлическими включениями.

Таким образом, даже в случае единичного включения электрический сигнал, возникающий при динамическом возбуждении образца бетона в зоне приема, является суперпозицией электрических полей от элементов двойных электрических слоев его поверхности, различным образом ориентированных по отношению как к направлению волны механического возбуждения, так и к плоскости приемника.

Регистрация электромагнитного отклика на ударное возбуждение материалов в наших экспериментах производилась с помощью дифференциального емкостного датчика, приемники которого представляют собой две пластинки, лежащие в одной плоскости. Использо-

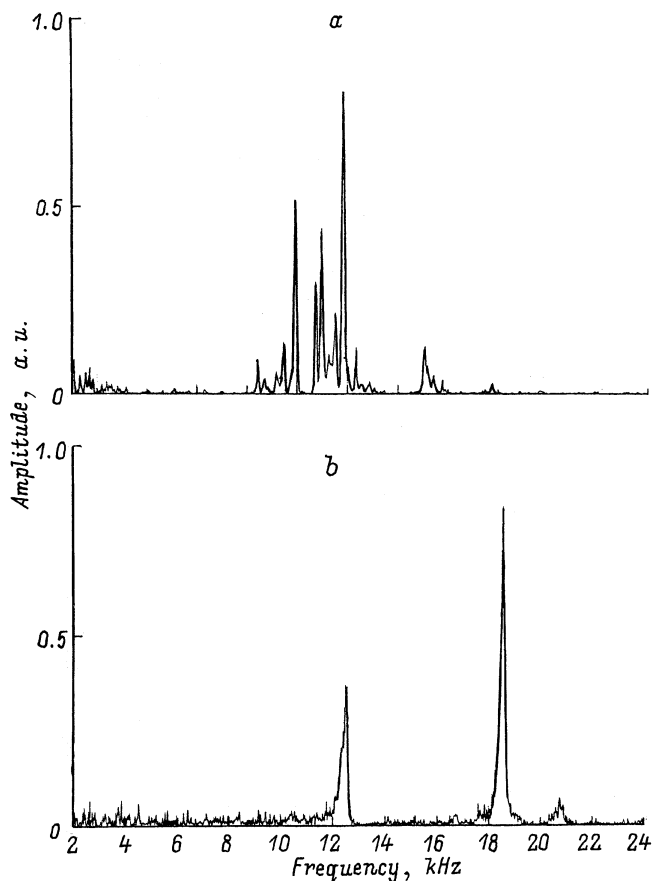


Рис. 1. Типичные спектральные характеристики электромагнитных откликов из модельных образцов бетона. Включение в виде зерна гравия (а) и металлической пластины (b).

ние такого типа датчика продиктовано необходимостью избавления от внешних электрических помех. Датчики имеют диаграмму направленности в виде восьмерки. Источники сигнала, векторы дипольных моментов которых совпадают с максимумом диаграммы направленности дифференциального датчика, будут им восприниматься наилучшим образом. И напротив, датчик будет нечувствителен к тем источникам, вектор дипольного момента которых перпендикулярен оси чувствительности датчика. Поэтому, вращая датчик вокруг своей оси, проходящей через центр диаграммы направленности, можно выделять источники сигнала, имеющие различные направления векторов дипольного момента. Для проверки данного предположения были проведены следующие эксперименты. Был изготовлен модельный образец размером $100 \times 100 \times 100$ мм, состоящий из цементного камня с помещенными в его середину двумя параллельными металлическими пластинками ($40 \times 40 \times 1$ мм). Схема проведения измерений представлена на рис. 3. Вращение электрического датчика осуществлялось в направлении, показанном стрелкой, и через каждые 18° производилось измерение электромагнитного отклика. На рис. 2 приведены амплитуды АЧХ электрических откликов, за-

регистрированных при изменении ориентации измерительного датчика от вертикального положения (0) до горизонтального (90°). Видно, что при вращении датчика наблюдается последовательное уменьшение одних составляющих спектра и возрастание других, что приводит к существенному изменению спектра электрического отклика. Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют в пользу механизма механоэлектрических преобразований в композиционных материалах, связанного с изменением дипольного момента элементов двойных электрических слоев поверхности источника, различным образом ориентированных по отношению как к направлению волны механического возбуждения, так и к плоскости приемника.

Напряжение на пластинах дифференциального датчика, обусловленное изменением дипольного момента источника сигнала в образце, описывается законами поля электрического тока. Следовательно, связь этого

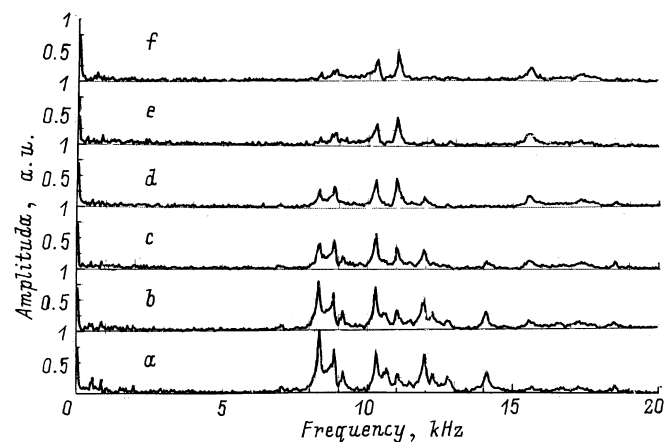


Рис. 2. Изменение амплитуды АЧХ электромагнитного отклика при повороте приемного датчика вокруг своей оси. Угол поворота: а — 0 (вертикальное положение), б — 18 , с — 36 , д — 54 , е — 72 , ф — 90° (горизонтальное положение).

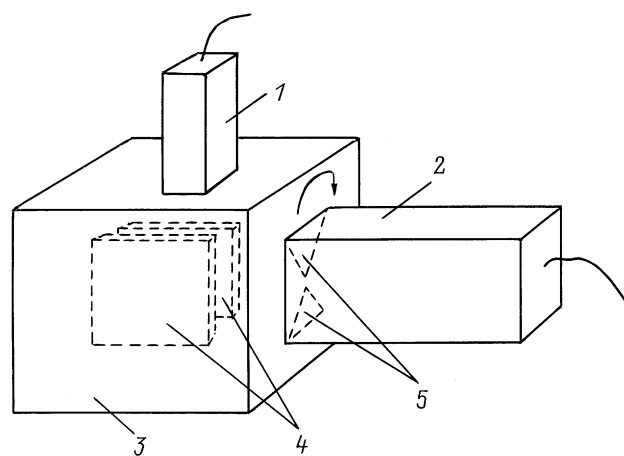


Рис. 3. Схема проведения испытаний. 1 — ударное устройство, 2 — дифференциальный электрический датчик, 3 — образец, 4 — включения, 5 — измерительные электроды.

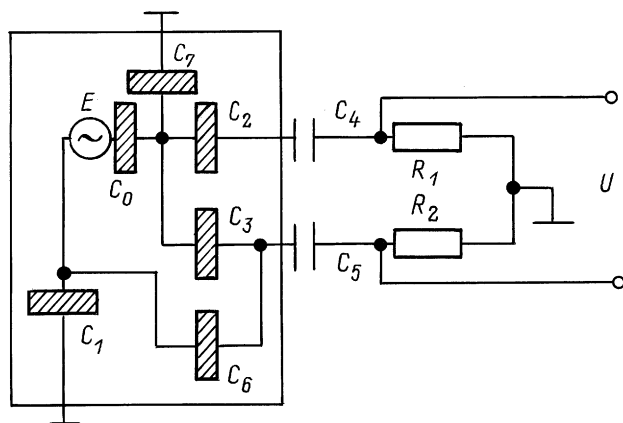


Рис. 4. Схема замещения измерительной электрической цепи.

напряжения с сигналом источника можно выразить через параметры электрической цепи с распределенными параметрами. Заменяя ее электрической цепью с сосредоточенными параметрами, можно получить качественные оценки того, как будет изменяться величина электрического отклика в дифференциальном приемнике при изменении размеров источника сигнала и его геометрии относительно приемного датчика. На рис. 4 показана схема замещения электрической цепи системы источник акустоэлектрического преобразования — дифференциальный емкостной приемник. Емкости C_2 и C_4 характеризуют емкостную связь одного из дифференциальных приемников с поверхностью двойного электрического слоя (C_4 — емкость зазора), емкости C_3 , C_5 — емкостную связь другого дифференциального приемника с той же поверхностью. Емкость C_6 характеризует емкостную связь того же приемника с противоположно заряженной поверхностью двойного электрического слоя. Сопротивления R_1 и R_2 — входные сопротивления дифференциального датчика ($R_1 = R_2 = R$). C_0 — емкость двойного электрического слоя, C_1 и C_7 характеризуют емкостную связь соответствующей поверхности двойного электрического слоя с "землей", E — напряжение источника сигнала. Так как, по нашему представлению, источником электрического сигнала является изменение ширины двойного электрического слоя акустической волной, то с точностью до множителя k частотная функция напряжения источника сигнала $E(\omega)$ равна

$$E(\omega) = \frac{k\eta(\omega)\sigma d}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ω — угловая частота колебания; η — относительная деформация двойного электрического слоя, нормальная к его поверхности; σ — поверхностная плотность зарядов слоя; d — ширина слоя; ε — относительная диэлектрическая проницаемость слоя; ε_0 — диэлектрическая постоянная; k характеризует кажущееся уменьшение напряжения источника сигнала по отношению к приемнику за счет того, что вектор дипольного момента

имеет направление, отличное от направления максимума диаграммы направленности приемника.

Упрощенная математическая модель акустоэлектрического преобразования на основании представленной физической модели вытекает из расчета указанной электрической схемы замещения. Система уравнений для токов I_k участков электрической цепи, составленных по методу контурных токов, имеет вид

$$\sum_{k=1}^4 a_{i,k} I_k = b_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

или в матричном виде

$$M \cdot I = b, \quad (3)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ E \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В уравнениях (2)–(4) аргумент ω в коэффициентах матрицы, токов и напряжения источника сигнала для простоты опущен. Для данной схемы коэффициенты матрицы имеют значения

$$\begin{aligned} a_{11} &= z_0 + z_3 + z_6; & a_{12} &= -z_3; & a_{13} &= -z_6; & a_{14} &= z_0; \\ a_{21} &= -z_3; & a_{22} &= z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + 2R; \\ a_{23} &= -(z_5 + R); & a_{24} &= 0; \\ a_{31} &= -z_6; & a_{32} &= -(z_5 + R); \\ a_{33} &= z_1 + z_5 + z_6; & a_{34} &= z_1; \\ a_{41} &= z_0; & a_{42} &= 0; & a_{43} &= z_1; & a_{44} &= z_0 + z_1 + z_7, \end{aligned}$$

z_N — реактивное сопротивление соответствующей емкости C_N ,

$$z_N = \frac{1}{j\omega C_N}, \quad C_N = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_N}{d_N}, \quad (5), (6)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость образца либо воздуха (для емкостной составляющей воздушного зазора); S_N — эффективная площадь соответствующей емкостной составляющей; d_N — геометрическое расстояние между поверхностями, формирующими емкость.

Точный расчет емкостных составляющих с использованием формулы (5) не может быть сделан, так как электрическое поле между соответствующими поверхностями неоднородно. Тем не менее для приближенной (качественной) оценки влияния глубины двойного электрического слоя по отношению к поверхности образца со стороны приемника, а также площади этого слоя на токи смещения в электрической схеме замещения эта формула может быть использована. Решение уравнения (3) относительно токов имеет вид

$$I = M^{-1}b. \quad (7)$$

Для указанной электрической схемы замещения (рис. 4) напряжение выходного сигнала выражается следующим образом:

$$U(\bar{\omega}) = R[2I_2(\bar{\omega}) + I_3(\bar{\omega})]. \quad (8)$$

Используя данный подход к рассмотрению процесса механоэлектрических преобразований в бетонах, становится возможным оценивать площадь поверхности двойного электрического слоя и его глубины залегания в образце относительно поверхности, ближайшей к приемнику сигнала. В качестве методического подхода к решению этой задачи проводили измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) электрического сигнала в зависимости от расстояния (между образцом и приемным датчиком) в модельных образцах с единичными плоскими включениями определенных размеров и геометрии их расположения внутри образца. Тогда в соответствии с приведенными выше расчетами в зависимости от соотношения геометрических размеров источника и глубины его залегания в образце характер зависимости амплитуды от расстояния будет изменяться. Следовательно, варьируя размерами включения и его расположением внутри образца, можно установить, как взаимосвязаны параметры источника с АЧХ электромагнитного отклика. Определение параметров включений (глубины залегания, геометрических размеров, ориентации включения по отношению к направлению удара и приемнику) открывает новые возможности для разработки алгоритмов более точного определения прочности, а также для целей дефектоскопии с использованием метода электромагнитной эмиссии.

Испытания производились следующим образом: образец устанавливался на заземленную металлическую пластину и с помощью специального ударного устройства производилось возбуждение образца. Электромагнитный отклик регистрировался емкостным датчиком, который укреплялся на специальный подвижный столик, установленный в непосредственной близости от поверхности образца. Изменение расстояния измерительного датчика от образца осуществлялось с помощью микрометрического винта, которым снабжен этот столик.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что изменение площади включения при одинаковой глубине залегания его внутри образца приводит к смещению кривой зависимости амплитуды выходного сигнала на фиксированной частоте от расстояния, а изменение глубины залегания включения — к изменению крутизны этой зависимости. При определенных соотношениях размера включения и глубины его залегания может реализоваться даже случай взаимного пересечения этих зависимостей. На рис. 5, *a* показаны экспериментальные результаты изменения амплитуды на частоте основного максимума АЧХ (12 kHz) в зависимости от расстояния для двух цементных образцов размером $100 \times 100 \times 100$ mm с единичными плоскими включениями. Параметры одного включения: площадь 60 mm^2 , расстояние до поверхности

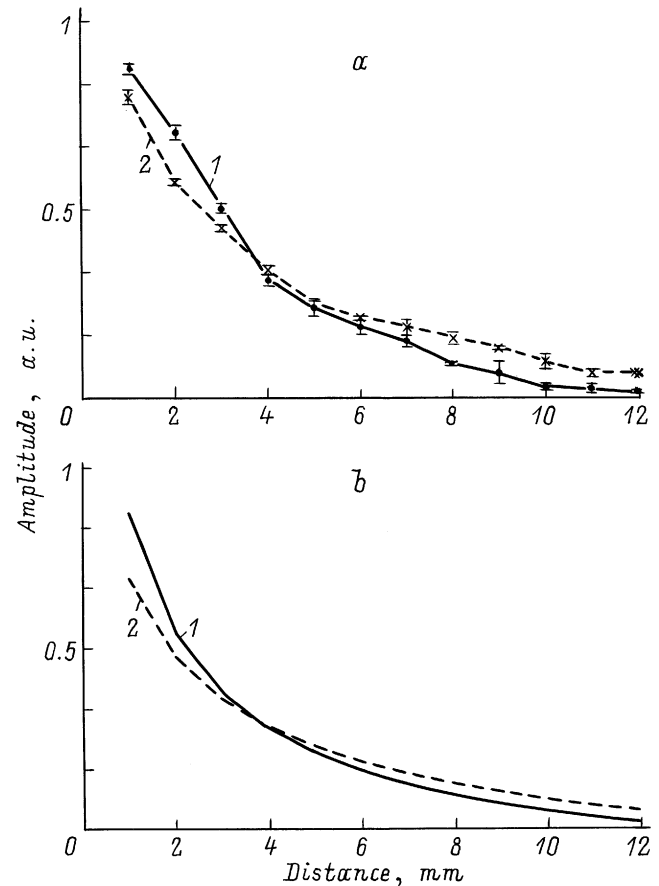


Рис. 5. Зависимости амплитуд основного максимума АЧХ электромагнитного отклика от расстояния при различной геометрии включения: *a* — экспериментальные, *b* — теоретические.

образца 96 mm (кривая 1). Параметры другого включения: площадь 120 mm^2 , расстояние до поверхности образца 80 mm (кривая 2). Приведенные на рис. 5, *a* достоверные интервалы (измерение в каждой точке производилось по 3 раза) свидетельствуют о том, что изменения в характере зависимостей носят статистически достоверный характер. Из рис. 5, *a* видно, что кривые 1 и 2 имеют как различную амплитуду, так и крутизну. При таком соотношении размеров включений и геометрии их расположения внутри образца реализуется как раз случай взаимного пересечения зависимостей амплитуды от расстояния. Расчетные значения зависимости амплитуды АЧХ от расстояния приведены на рис. 5, *b*. Они были получены путем подстановки в уравнение (5) значения глубины включения (с учетом расстояния между приемниками), расстояний между включениями и заземляющей плоскостью (на которую установлен образец) и между плоскостью приемников и поверхностью образца, а также площади поверхности двойного электрического слоя, нахождения коэффициентов матрицы решения уравнений (7), (8). Хорошее качественное совпадение характера экспериментальных и теоретических зависимостей подтверждают правиль-

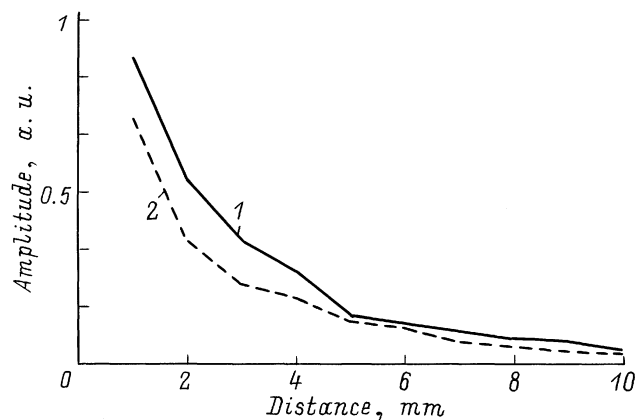


Рис. 6. Зависимость амплитуды электромагнитного отклика от расстояния для образца с единичным металлическим включением: 1 — без заземления включения, 2 — с заземленным включением.

ность выбранной модели механоэлектрических преобразований.

Дополнительным подтверждением предлагаемого механизма возникновения электромагнитного отклика и его связи с геометрическими характеристиками включений согласно приведенным выше теоретическим расчетам схемы замещения измерительной электрической цепи служат экспериментальные результаты, в которых проведено исключение из схемы регистрации емкостей $C1$ и $C7$ путем заземления металлического включения. Показано, что характер зависимости амплитуды сигнала от расстояния в экспериментах без заземления включения и с заземлением отличается как по величине, так и по крутизне (рис. 6).

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что параметры амплитудно-частотных характеристик электромагнитного отклика на ударное возбуждение композиционных материалов, состоящих из цементно-песчаного вяжущего и заполнителя, зависят от геометрии расположения заполнителя внутри образца и его размеров. Полученные результаты свидетельствуют в пользу механизма механоэлектрических преобразований, связанного с возбуждением двойного электрического слоя на границе контакта разнородных материалов в композиционных материалах.

Получение конкретных данных о структурных особенностях реальных бетонов, имеющих в своем составе большое количество источников механоэлектрических преобразований (зерен заполнителя) и произвольную геометрию их расположения внутри объекта испытания, является задачей дальнейших исследований с привлечением методов статистического анализа. Разработка этого направления исследований позволит усовершенствовать неразрушающий электромагнитный метод контроля прочности композиционных материалов и повысить его надежность и достоверность.

Список литературы

- [1] Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В. и др. // Изв. вузов. М.: Строительство, 1995. № 5. С. 3–7.
- [2] Фурса Т.В., Ласуков В.В., Малышков Ю.П. и др. // Изв. вузов. М.: Строительство, 1997. № 10.
- [3] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 51–55.
- [4] Гордеев В.Ф., Елисеев В.П., Малышков Ю.П. и др. // Дефектоскопия. 1994. № 4. С. 48–54.