

05:08;12

Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах

© Т.В. Фурса, Н.Н. Хорсов, Е.А. Батурин

Томский политехнический университет
634034 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 19 мая 1998 г.)

Исследовались акустоэлектрические преобразования в бетонах с использованием методов физического моделирования. Расчетами электрической схемы замещения электрического поля в системе образец–приемник показано отсутствие влияния поверхности образца на параметры сигнала. Расчеты подтверждены исследованием временных и спектральных характеристик акустоэлектрических преобразований в модельных и реальных бетонах.

Бетоны и конструкции из них чаще всего эксплуатируются в условиях, где они подвергаются воздействию внешних условий и находятся под действием как статических, так и динамических нагрузок. В таких условиях высока вероятность их непредвиденного разрушения в процессе эксплуатации. Поэтому задача диагностики разрушения имеет очень важное практическое значения. Как показано в наших предыдущих исследованиях [1,2], явление электромагнитной эмиссии может быть использовано для решения проблем контроля за процессами разрушения бетонов и диагностики их прочности.

Электромагнитная эмиссия, возникающая при динамическом возбуждении образца бетона в зоне приема, согласно используемой нами методике проведения испытаний, является суперпозицией сигналов, обусловленных акустоэлектрическими характеристиками зерна заполнителя, контакта заполнителя с цементной основой, самой цементной основы, поверхности образца и их геометрией по отношению к приемнику.

Разрушение бетонов чаще всего происходит по контакту наполнителя и цементной основы. Кроме того, состояние внешней поверхности также оказывает влияние на механические характеристики бетонов. Для разработки электромагнитного метода контроля механических характеристик бетонов важно выявить источники электромагнитной эмиссии внутри бетона и на его поверхности и определить вклад каждого из этих источников в общий сигнал. Особенно важно выделить долю электромагнитного отклика, связанную непосредственно с внутренними дефектами, так как именно они оказывают наиболее существенное влияние на механические характеристики бетона. Кроме того, по времени регистрации электромагнитного отклика от внутреннего дефекта относительно момента удара можно было бы определять глубину залегания дефектной зоны.

Для исследования влияния внутренних источников электромагнитной эмиссии на параметры электромагнитного сигнала при динамическом возбуждении бетонов были проведены специальные эксперименты. Чтобы разделить во времени электромагнитный отклик при возбуждении внутреннего источника электромагнитной

эмиссии и источника, связанного с колебаниями поверхности образца, поляризованной за счет индукции от внутреннего источника, был изготовлен модельный образец. В цементно-песчаную смесь, из которой был сформован образец размером $100 \times 100 \times 100$ mm, поместили пьезоэлектрический элемент, с обкладок которого были выведены на поверхность образца электрические провода. Схема эксперимента заключалась в следующем. По одной из поверхностей модельного образца производился динамический удар и с помощью двухканального прибора "Emission" [3] одновременно регистрировались два электрических сигнала: один непосредственно с пьезоэлемента и второй электромагнитным датчиком, расположенным на расстоянии 3 mm от поверхности, перпендикулярной к той поверхности, по которой производили удар. Чтобы оценить время прохождения ударной волны по образцу к поверхности, у которой расположен электромагнитный датчик, было измерено время задержки между электрическими сигналами с двух пьезодатчиков, один из которых расположен на поверхности образца, а другой — внутри образца на определенной глубине и определена скорость распространения упругой волны в данном образце. Пьезоэлемент в данном эксперименте находился на расстоянии 50 mm от электромагнитного датчика, и оценочное время прихода акустической волны к поверхности, возле которой расположен электромагнитный датчик, составляло $50 \mu\text{s}$. При разрешении аппаратуры $\approx 1 \mu\text{s}$ оказалось вполне возможным определить временные задержки при разнесении источников сигнала в пространстве до 1 mm. В случае если электромагнитный отклик регистрируется непосредственно от внутреннего источника (пьезоэлемента), время задержки этого сигнала по сравнению с регистрацией сигнала по проводам определяется временем поляризации образца ($< 10^{-10}$ s), т.е. практически задержки нет (рис. 1). Из рисунка видно, что время появления этих двух сигналов совпадает. В случае же, когда вместо приемника электромагнитной эмиссии на ту же поверхность, возле которой располагается электромагнитный датчик, был прикреплен датчик акустической эмиссии, наблюдалось смещение по времени прихода электромагнитного (*a*) и акустического (*b*) сигнала на $50 \mu\text{s}$ (рис. 2).

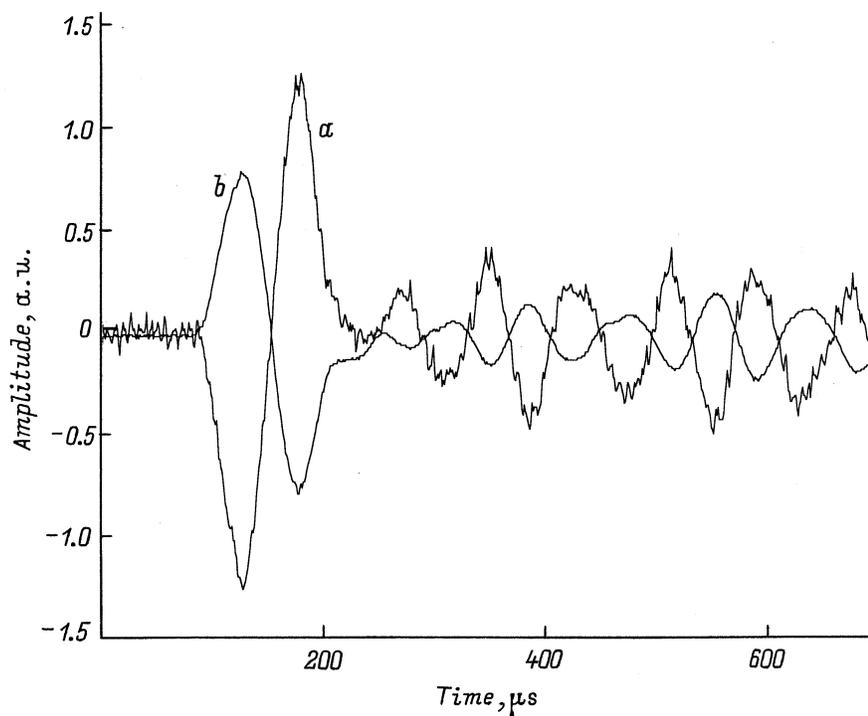


Рис. 1. Электрический отклик (*a*) и электрический сигнал с пьезоэлемента (*b*), зарегистрированные при ударном возбуждении модельного образца.

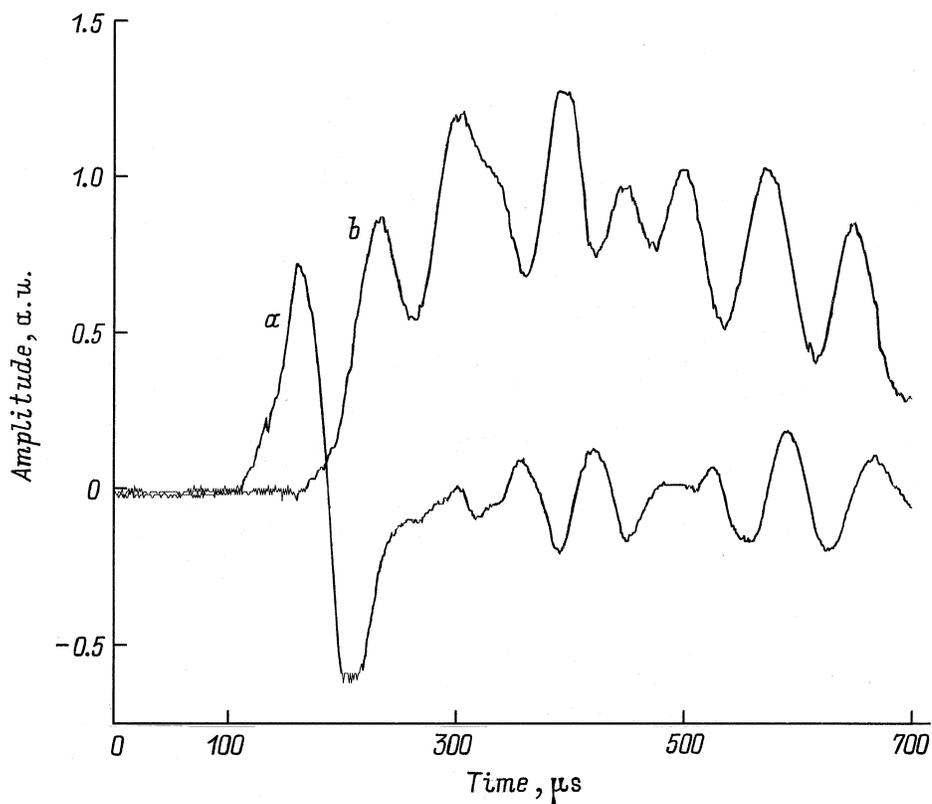


Рис. 2. Акустические колебания поверхности (*a*) и электрический сигнал с пьезоэлемента (*b*), зарегистрированные при динамическом возбуждении модельного образца.

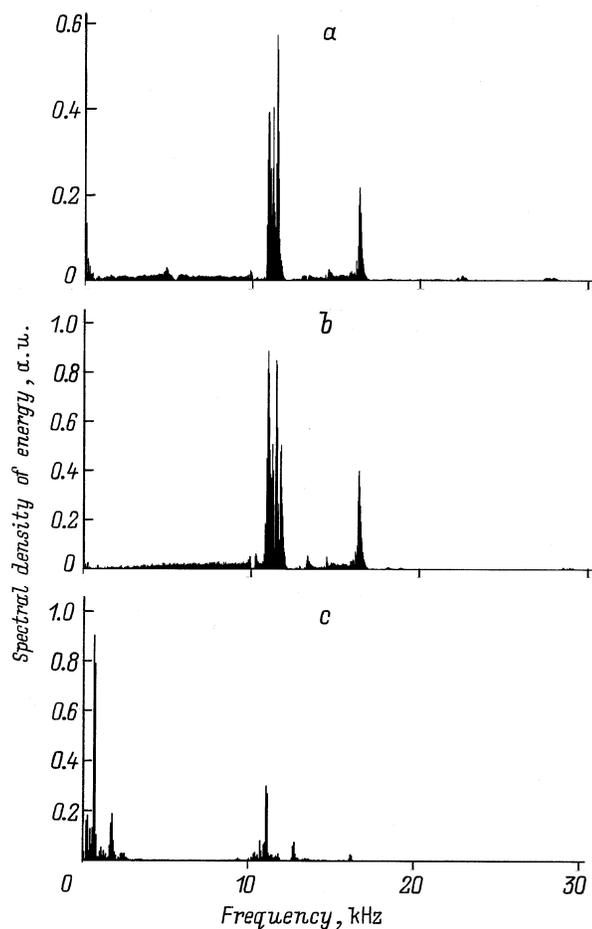


Рис. 3. Спектральные характеристики импульсов, зарегистрированных при динамическом возбуждении модельного образца: *a* — электромагнитный отклик, *b* — сигнал от внутреннего пьезоэлемента, *c* — акустический сигнал.

При помещении в цементно-песочную смесь вместо пьезоэлемента гальки картина процесса не изменяется, т. е. если с одной и той же поверхности образца одновременно регистрировать электромагнитный и акустический сигналы, то задержка по времени появления этих импульсов составляет те же $50 \mu\text{s}$ при условии, что галька находится внутри образца на той же глубине, что и пьезоэлемент.

Временной характер сигналов, зарегистрированных с помощью электромагнитного датчика и с пьезоэлемента, очень близки по форме. Для того чтобы определить, имеются ли различия в этих сигналах, были рассчитаны их спектральные характеристики. Сравнение спектральной плотности энергии импульсов с пьезоэлемента и электромагнитного датчика (рис. 3) показывает, что спектры электромагнитного сигнала (*a*) и сигнала с пьезоэлемента (*b*) практически идентичны, имеются лишь незначительные различия. Сравнение же спектральной плотности энергии сигналов, регистрируемых с пьезоэлемента (рис. 3, *b*) и акустического датчика (рис. 3, *c*), показывает, что в спектрах этих импульсов имеются

значительные различия. В частности, в спектре сигнала с пьезоэлемента практически отсутствуют составляющие ниже 5 kHz , присутствующие в акустическом импульсе, которые как раз и могут быть вызваны поверхностными волнами, вблизи которых расположен электромагнитный датчик.

Для оценки вклада поверхностных колебаний в регистрируемый электромагнитный сигнал, регистрируемый при ударном возбуждении объекта исследования, были произведены теоретические расчеты этого вклада с использованием указанной выше схемы измерений. Емкостный датчик воспринимает ток смещения, источником которого являются акустоэлектрические преобразования. Ток смещения моделируется колебаниями поверхности образца, обращенной к плоскости приемной пластины датчика. Величина тока определяется распределенными и сосредоточенными параметрами замкнутой электрической цепи и описывается уравнением поля электрического тока [4]

$$\nabla \left(\gamma \mathbf{E} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{E} — напряженность электрического поля, под действием которого происходит движение электрических зарядов; γ — проводимость электрической цепи; ε и ε_0 — относительная диэлектрическая проницаемость среды тока смещения и диэлектрическая постоянная соответственно; ∇ — дифференциальный оператор

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}.$$

Для оценки влияния колебания поверхности на величину тока (уровня модуляции) необходимо решать (например, численным методом) уравнение (1) с учетом временных факторов изменения краевых условий. Вместе с тем проще осуществить оценку уровня модуляции, заменяя описываемую схему с распределенными параметрами электрической схемой замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 4).

На схеме $E(\omega)$ — эдс участка цепи; C_1 — емкость системы акустоэлектрический преобразователь—поверхность образца, обращенная к приемнику сигнала;

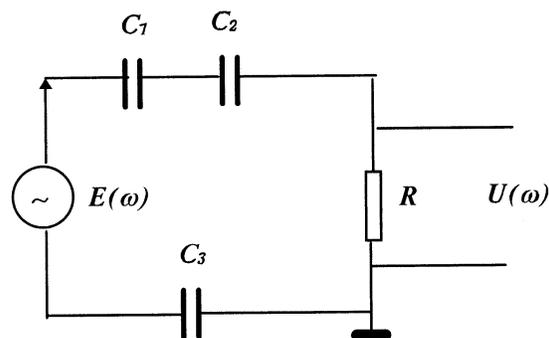


Рис. 4. Электрическая схема замещения цепи сигнала акустоэлектрического преобразования.

C_2 — емкость системы поверхность образца–пластина приемника; C_3 — емкость системы акустоэлектрический преобразователь–заземленная поверхность, замыкающая цепь и включающая в себя внутренний импеданс эдс участка цепи; R — входное сопротивление емкостного датчика (входной емкостью $C_{вх}$ при круговой частоте $\omega < 1/RC_{вх}$ пренебрегаем); $U(\omega)$ — выходное напряжение. Выходное напряжение определяется по формуле

$$U(\omega) = E(\omega) \cdot \frac{R}{(1/j\omega C_1 + 1/j\omega C_2 + 1/j\omega C_3 + R)}. \quad (2)$$

Емкости C_1 , C_2 и C_3 можно представить в виде

$$C_1 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d_1}, \quad C_2 = \varepsilon_0 \frac{S}{d_2}, \quad C_3 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S_3}{d_3},$$

где S — эффективная площадь двухслойного конденсатора, S_3 — эффективная площадь замыкающей емкости, d_1 — эффективное расстояние от источника сигнала до поверхности образца, d_2 — эффективное расстояние от поверхности до пластины емкостного датчика, d_3 — эффективное расстояние от источника тока до поверхности заземлителя; ε — относительная диэлектрическая проницаемость образца, ε_0 — диэлектрическая постоянная.

Следует отметить произвольность представления участков электрической цепи, в которых имеет место ток смещения, плоскими конденсаторами. Такое представление оправдано тем, что для плоского конденсатора имеет место наибольшая зависимость изменения емкости от расстояния между пластинами по сравнению со сферическим или цилиндрическим, т.е. реализуется наиболее благоприятная ситуация по отношению к модуляции сигнала колеблющимися поверхностями.

Подставляя значение емкостей в уравнение (2) и производя преобразование, получим

$$U(\omega) = E(\omega) R j \omega \varepsilon \varepsilon_0 S \times \frac{1}{(d_1 + \varepsilon d_2) + d_3 S / S_3 + j \omega \varepsilon \varepsilon_0 S R}. \quad (3)$$

Приращение напряжения выхода ΔU , обусловленное изменением расстояния d_1 на величину δd и d_2 — на величину $-\delta d$ (d_1 и d_2 меняются в противофазе), можно найти, представляя Δd как дифференциал функции $U = f(d_1, d_2)$ (здесь и в дальнейшем аргумент ω при U и E для простоты опущен),

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial d_1} \delta d + \frac{\partial U}{\partial d_2} (-\delta d). \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получим

$$\Delta U = E \cdot R \cdot j \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \times \frac{\delta d \cdot (\varepsilon - 1)}{(d_1 + \varepsilon \cdot d_2 + d_3 S / S_3 + j \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot R)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент модуляции K определим как

$$K = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\delta d \cdot (\varepsilon - 1)}{d_1 + \varepsilon \cdot d_2 + d_3 S / S_3 + j \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot R}. \quad (6)$$

Оценочные расчеты с учетом энергии удара, длительности удара (ширины спектра возбуждения), спектральных составляющих поверхностных волн, упругих постоянных бетона дают для δd величины порядка десятка микрон при самых благоприятных условиях, в то время как d_1 и d_2 могут иметь значения от единиц миллиметров до десятков сантиметров. Таким образом, как видно из последнего выражения, модуляция практически не дает вклада в регистрируемый сигнал.

Следовательно, когда внутри образца имеется источник электромагнитной эмиссии, параметры электромагнитного отклика от образца, в который помещен этот источник, практически полностью определяются его собственными акустоэлектрическими характеристиками. Время задержки появления электромагнитного отклика по сравнению с моментом удара может служить критерием определения глубины залегания внутреннего источника акустоэлектрических преобразований (дефекта) внутри образца относительно точки удара. Однако если в образце имеется большое количество источников, то минимальное время задержки электромагнитного отклика будет определять глубину залегания источника, ближайшего к поверхности, по которой производится удар. Чтобы определять глубину залегания наиболее опасного дефекта и его параметры необходимо проведение дальнейших исследований в этом направлении.

Подобная приведенной в данных модельных экспериментах картина наблюдается при испытании бетонов со случайным распределением источников электромагнитной эмиссии, когда динамическому возбуждению подвергается источник электромагнитной эмиссии в виде зерна заполнителя, выходящего на поверхность бетона. В качестве примера приведем результаты следующего эксперимента. Для исследования была взята бетонная балка размером $1200 \times 130 \times 65$ см. С помощью ударного устройства производилось механическое возбуждение одного из выступающих на поверхность зерен заполнителя. Балка была взята с той целью, чтобы иметь возможность регистрации сигналов электромагнитной и акустической эмиссии при разнесении их на достаточно большие расстояния. Сначала электромагнитный и акустический датчики расположили на одинаковом расстоянии (25 см) от ударника (рис. 5). Из рисунка видно, что сначала регистрируется сигнал электромагнитной эмиссии, а уже затем с задержкой, составляющей $165 \mu\text{s}$, появляется акустический сигнал. Если электромагнитный датчик оставить на прежнем месте, а акустический сместить в сторону ударного устройства, то время задержки уменьшается пропорционально изменению расстояния. Минимальная задержка регистрируется, когда

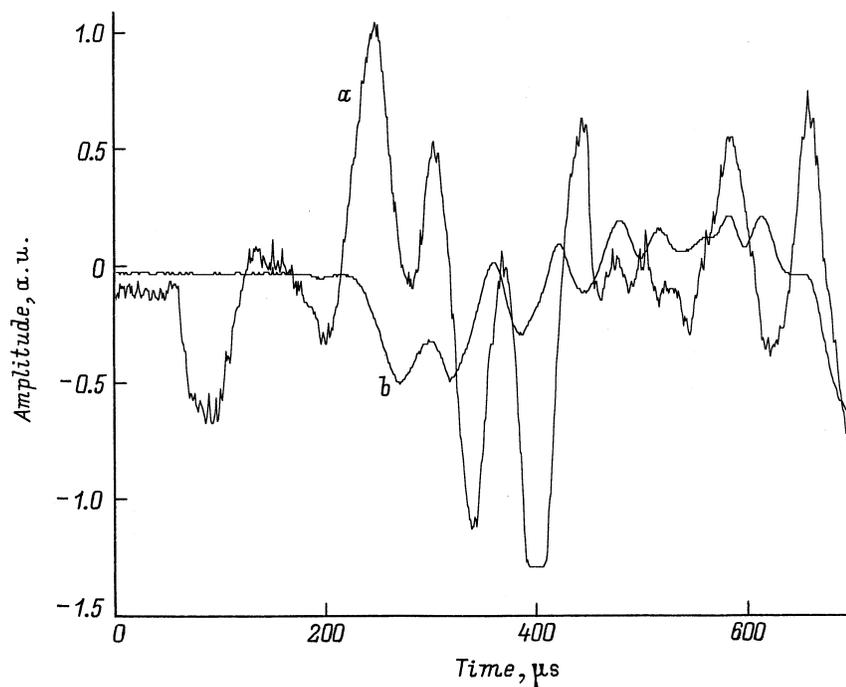


Рис. 5. Электромагнитный отклик (*a*) и акустическое колебание поверхности (*b*), зарегистрированные при динамическом возбуждении бетонной балки.

акустический датчик находится на самом минимальном расстоянии от ударника. При дальнейшем перемещении акустического датчика в противоположную от электромагнитного датчика и ударного устройства сторону снова происходит увеличение задержки.

Кроме того, электромагнитный отклик при проведении испытаний на балках, имеющих по сравнению с модельным образцом, состоящим из цементной основы и одного пьезоэлемента, более сложную структуру из-за наличия большого количества неоднородных по механическим и электрическим свойствам зерен заполнителя, имеет и более сложную форму (рис. 5, *a*). Видимо, в данном случае регистрируется электромагнитный отклик от многих источников, расположенных по трассе распространения акустической волны через балку.

В данном примере приведен конкретный случай возбуждения источника электрических сигналов (удар по гальке, выступающей на поверхность балки). Однако в сложных гетерогенных системах, какими являются бетоны, обычно картина акустоэлектрических преобразований является еще более сложной. Если производить удар по поверхности балки в разных местах, то в зависимости от расположения внутренних источников акустоэлектрических преобразований, каковыми являются зерна заполнителя, и их упругих и электрических характеристик наблюдаются различные варианты по времени появления акустических и электромагнитных сигналов. Иногда наблюдаются случаи, когда при равноудаленных от ударного устройства акустического и электромагнитного датчиков сигналы с этих датчиков регистрируются одновременно. Это связано с тем, что

случайным образом акустический приемник оказывается вблизи источника акустоэлектрического преобразования, электрическое поле которого по энергии превышает порог регистрации приемника. При этом вследствие малого коэффициента акустоэлектрического преобразования других источников, до которых упругая волна доходит раньше, они приемником электромагнитного сигнала не регистрируются. Т. е. происходящие акустоэлектрические преобразования в таких сложных гетерогенных системах, какими являются бетоны, также очень сложны и требуют дальнейших исследований.

Проведенные исследования показывают, что определяющую роль в генерировании электромагнитной эмиссии бетонов при динамическом возбуждении играют зерна заполнителя. Колебания поверхности образца, обусловленные механическим возбуждением, практически не оказывают влияния на сигнал акустоэлектрического преобразования. По времени прихода электромагнитных импульсов относительно момента возбуждения принципиально возможно определять глубину залегания внутреннего дефекта.

Список литературы

- [1] Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф. и др. // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 5–6. С. 54–58.
- [2] Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В. и др. // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 5. С. 3–7.
- [3] Гордеев В.Ф., Елисеев В.П., Малышков Ю.П. и др. // Дефектоскопия. 1994. № 4. С. 48–54.
- [4] Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968.