

05.1;09

©1994

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ В БЕТОНАХ

*Т.В.Фурса, В.Ф.Гордеев,
В.В.Ласуков, Ю.П.Малышков*

Сравнительно давно обнаружено, что диэлектрики могут генерировать электромагнитный сигнал при их механическом возбуждении [1]. Однако физическая природа этого явления, зависящего от многих факторов (физических и химических свойств материала, способа и уровня возбуждения, масштабного фактора), изучена недостаточно.

В этой связи проведены теоретические и экспериментальные исследования механизмов генерирования электромагнитных импульсов на основе изучения зависимости амплитуды сигнала от расстояния между приемником и поверхностью образца.

Для решения задач дефектоскопии обычно используется аппаратура, рабочий диапазон которой лежит в пределах 1–100 кГц, так что измерения всегда проводятся в ближней зоне ($r < \lambda$), где напряженность электрического поля элементарного заряда равна [2]

$$E = \frac{[3n_r \cos \theta - n_D] D}{4\pi\epsilon_0\epsilon I^3} \exp(-r/\delta), \quad (1)$$

где $n_r = \mathbf{r}/|\mathbf{r}|$, $n_D = \mathbf{D}/|\mathbf{D}|$, θ — угол между n_r и n_D , $D = Q * x(t)$, Q — величина отдельного заряда, $x(t)$ — величина смещения заряда.

Множитель $\exp(-r/\delta)$ учитывает ослабление поля в среде и $\delta = c\sqrt{\epsilon_0}/(2\pi\nu\sigma)$. Так как электромагнитный метод используется только для диэлектриков, то всегда ($r < \delta$). Поэтому этим множителем можно пренебречь.

При интегрировании выражения (1) по области, занятой совокупностью элементарных источников, получим, что напряженность электрического поля, генерируемого совокупностью элементарных источников равна

$$\langle \mathbf{E} \rangle = N_{0,n} \frac{[3n_r \cos \theta - n_D] D}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \chi_{0,n}. \quad (2)$$

Если заряженная область является объемной, то в (2) N_0 — это объемная плотность заряда. Если же заряженная область является плоской, то в (2) N_n — это поверхностная плотность заряда.

Соответственно, в первом случае (объемный заряд)

$$\chi_0 = \int_0^{R_{\max}} \frac{dV'}{r^3} = 4\pi \left\{ \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) - x \right\} \cong \frac{4\pi R_{\max}^3}{3r^3}. \quad (3)$$

Во втором случае (поверхностный источник)

$$\chi_n = \int_0^{R_{\max}} \frac{dS'}{r^3} = \frac{2\pi}{h} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{R_{\max}^2}{h^2} \right)^{-1/2} \right\}. \quad (4)$$

Здесь R_{\max} — линейный размер заряженной области, h — удаление приемника от поверхности образца.

После усреднения (2) по углу получим

$$E = \sqrt{\langle E^2 \rangle} = \frac{\sqrt{2} N_{0,n} \chi_{0,n} D}{4\pi\epsilon_0\epsilon}, \quad (5)$$

где $\langle E^2 \rangle = \frac{1}{4\pi} \int E^2 d\Omega$.

Таким образом, для модели поверхностных зарядов

$$E_n \approx \begin{cases} \frac{1}{h}, & \text{при } h < R_{\max} \\ \frac{1}{h^3}, & \text{при } h > R_{\max} \end{cases}$$

Для объемной заряженной области при любых r

$$E_0 \approx \frac{1}{r^3}.$$

Так как измерения проводились емкостным датчиком, то прибором регистрировался ток смещения, так что напряжение на входе прибора равно

$$U = jS_g Z, \quad (6)$$

где $j = 4\pi\epsilon dE/dt$ — плотность тока смещения, E — определяется формулой (5), S_g — площадь датчика, $Z = X_c R_{in} / \sqrt{X_c^2 + R_{in}^2}$ — полное сопротивление внешней измерительной цепи, $R_{in} = 15 \text{ МОм}$, $X_c = 1/\omega C$ — емкостное сопротивление измерительной системы и $C = \frac{C_0 C_B}{C_0 + C_B}$, здесь $C_B = \frac{\epsilon_0 S_g}{4\pi h}$ — емкость воздушного конденсатора, образованного поверхностью образца и поверхностью датчика, $C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S_0}{4\pi d_0}$ — емкость образца, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость образца, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, d_0 — толщина образца, h — величина воздушного зазора.

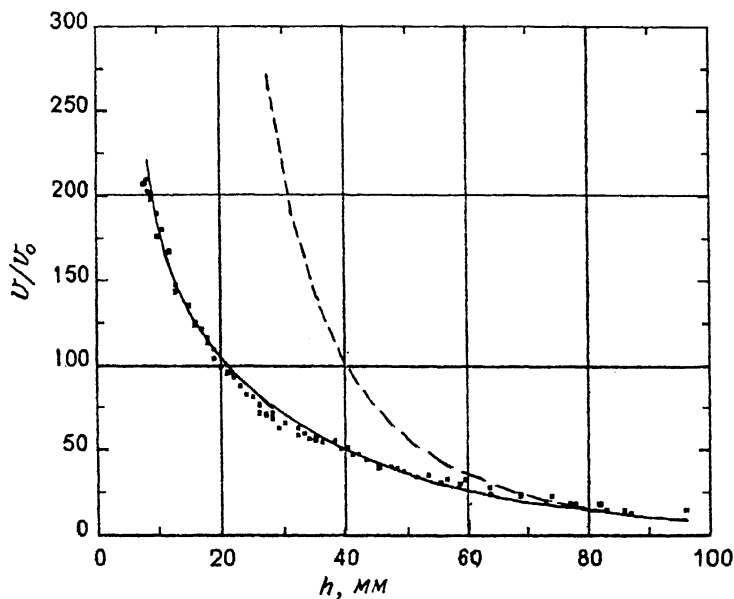
Окончательно, для модели поверхностных излучателей

$$U = U_0 \left\{ 1 - \left(1 + \frac{R_{\max}^2}{h^2} \right)^{-1/2} \right\} \left[1 + \frac{d_0 S_g}{S_0 \epsilon_0 \epsilon h} \right]. \quad (7)$$

Здесь $U_0 = E_0 a$, $E_0 = 4\pi\sigma_0/\epsilon_0$, $\sigma_0 = Q N_n$ — поверхностная плотность заряда, a — амплитуда упругих колебаний.

Выражения (5 и 7) могут быть проверены экспериментально путем измерения величины амплитуды сигнала электромагнитной эмиссии при различной удаленности приемника поля от поверхности образца. С этой целью были проведены исследования на образцах бетона марки 300 и 400. В качестве наполнителя в образцах бетона использовался либо щебень, либо галька. Образцы бетонов кубической формы ($100 \times 100 \times 100$) мм возбуждали однократным нормированным ударом вибратора с мощностью, не превышающей 5 Вт. Такой удар был достаточен, чтобы возбудить в образцах электромагнитные импульсы и зарегистрировать их приемником поля. Импульсный электромагнитный сигнал воспринимался емкостной дифференциальной антенной, усиливался в полосе частот от $2 \cdot 10^2$ до $3 \cdot 10^5$ Гц и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В АЦП происходила оцифровка аналогового сигнала с частотой преобразования 160 кГц. Результаты оцифровки запоминались и производилось определение максимальной амплитуды сигнала на персональной компьютерной системе.

Датчик электромагнитной эмиссии устанавливали вблизи одной из граней и измеряли максимальную амплитуду



Зависимость амплитуды электромагнитного отклика от расстояния между датчиком и поверхностью образца; *точки* — экспериментальные значения; *сплошные и пунктирные линии* — теоретические зависимости (7) и (5) соответственно.

электромагнитного отклика на нормированный удар. Затем датчик отодвигали от образца и повторяли измерения. На рисунке точками показаны экспериментально измеренные амплитуды электромагнитного отклика при различных расстояниях между датчиком и поверхностью одного из образцов бетона. *Сплошной линией* показана зависимость между относительной амплитудой сигнала U/U_0 и расстоянием, рассчитанная по выражению (7), а *пунктирной линией* — рассчитанная по выражению (5) с учетом (3). Хорошее совпадение экспериментальных точек с теоретической зависимостью (7) и отсутствие совпадения с выражением (5) позволяют сделать однозначный вывод о том, что источник электромагнитной эмиссии в образцах бетона представляет собой некоторую излучающую поверхность, а не объемный источник. Этот вывод был неоднократно проверен на нескольких образцах бетонов различных марок. Ни в одном из случаев экспериментальные точки не удалось совместить с зависимостями, описывающими объемный источник сигнала.

Для выяснения физической природы происхождения заряженных пятен на внешней поверхности образцов были

проведены измерения электромагнитного сигнала на образцах цементного камня (без наполнителя). При этом было обнаружено, что такие образцы не генерируют электромагнитный сигнал, так что появление заряженных пятен на поверхности обусловлено наполнителем.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) источником эмиссии являются заряженные области внешней поверхности образца;

2) заряженные пятна поверхности формируются за счет индукции от объемных заряженных областей, находящихся внутри бетона. Такими внутренними областями могут являться, например, границы раздела между наполнителем и цементным камнем.

Список литературы

- [1] *Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набитов В.В.* // Кристаллография. 1962. Т. 7. В. 4. С. 576-580.
- [2] *Соколов А.А., Тернов Л.М.* Релятивистский электрон. М., 1974 с. С. 34-36.

Томский политехнический
университет

Поступило в Редакцию
14 июня 1994 г.
