

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. А.А. Беспалько^{1,*}, А.П. Суржиков^{1,**}, Д.Д. Данн^{1,***}, Г.Е. Уцын^{2,****}, М.В. Петров¹, Е.К. Помишин¹

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 40

E-mail: *besko48@tpu.ru; **Surzhikov@tpu.ru; ***DDDann@tpu.ru; ****uge23@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.09.2020; после переработки 03.12.2020

Принята к публикации 11.12.2020

Показано влияние дефектности твердотельных диэлектрических образцов на параметры электромагнитного отклика при детерминированном акустическом воздействии на объект контроля. Приведены закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов при вариациях и увеличении вектора напряженности электрического поля по отношению к контакту материалов образца и дефекта. Показано, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с акустическим импедансом и проводимостью контактирующей среды и дефекта. Установлено соответствие амплитуд электромагнитных откликов на определенное при математическом моделировании распределение во времени и пространстве механических напряжений, возникающих в дефектной системе при распространении акустического импульса. Приведены данные изменения параметров электромагнитных сигналов при увеличении размеров модельных дефектов в однотипных образцах.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, диэлектрики, акустическое воздействие, электромагнитная эмиссия, электрическое поле, моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308221020019

ВВЕДЕНИЕ

Для обнаружения дефектности твердотельных материалов в настоящее время используют различные, достаточно хорошо разработанные, неразрушающие методы контроля. К ним относятся: акустические импульсные и акустико-эмиссионные [1, 2]; электрические и электромагнитные [3, 4]; магнитные [5, 6]; рентгеновские [7, 8] и другие [9]. Для диэлектрических материалов и структур такое разнообразие неразрушающих методов эффективно использовать можно не везде. Это обусловлено высокой проникаемостью рентгеновского излучения и его опасным влиянием на здоровье оператора, отсутствием магнитных свойств в подавляющем большинстве диэлектриков, близкими величинами акустического импеданса при ультразвуковом зондировании.

Раннее выявление дефектности диэлектрических структур имеет большое значение для контроля их механической и электрической прочности. В целях безопасности необходимо периодически проводить неразрушающий контроль изоляторов, конструкционных органических диэлектриков, бетонных конструкций и других диэлектрических структур и изделий. В связи с этим целесообразно применять комплексные методы неразрушающего контроля. Таким комплексным методом может являться контактное акустическое зондирование предмета контроля и бесконтактная регистрация электромагнитного отклика на такое воздействие с последующим амплитудно-частотным анализом электромагнитного сигнала (ЭМС). Электромагнитный сигнал возникает при колебании двойных электрических слоев, возникающих на бортах трещин и полостей, при поляризации контактов материалов, слоев и других дефектов [9—18]. Математическим моделированием и лабораторными исследованиями показано, что такие преобразования являются одним из основных способов возбуждения ЭМС в гетерогенных диэлектрических материалах. Акустические импульсы при своем распространении взаимодействуют с имеющимися и вновь возникшими дефектами. В результате такого воздействия заряды или двойные электрические слои на границах раздела сред, включений или блоков, на бортах трещин или на других дефектах структуры диэлектрических материалов излучают электромагнитные сигналы.

В работе [19] в теоретических исследованиях приведено физическое обоснование электромагнитного метода контроля диэлектрических гетерогенных материалов. Указывается, что в случае, когда нормированным однократным ударом производится возмущение механических колебаний, это должно способствовать появлению тока смещения. В свою очередь, ток смещения будет зависеть от скоростей изменения объемной плотности элементарных источников и дипольного момента.

Величина поверхностных зарядов, их пространственная структура и амплитуда колебаний определяется для исследуемых образцов физико-химическими свойствами их внутренних областей.

В экспериментальных работах [18—21] также указывается, что прохождение акустических волн вызывает генерацию ЭМС, которая связана с колебаниями двойных электрических слоев. Выявлено, что в результате акустико-электрических преобразований происходит передача энергии акустических сигналов в энергию ЭМС. При этом амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов и зарядового состояния имеющихся дефектов в виде включений.

Таким образом, при внешнем детерминированном акустическом воздействии можно успешно осуществлять тестирование дефектности в виде твердотельных включений или пустот в диэлектрические материалы по параметрам электромагнитных откликов на это возмущение. Было проведено численное и экспериментальное моделирование такого тестирования. В настоящей работе рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения параметров ЭМС и их спектров при импульсном детерминированном акустическом возбуждении модельных образцов с дефектами в виде твердотельных включений.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выявления закономерностей влияния размеров и электрических свойств дефектов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении изготавливали образцы из цементно-песчаной смеси с размещением в них твердотельных включений в виде параллелепипеда. На рис. 1а схематично приведен вид такого образца с размерами $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$. Боковая поверхность $(50 \times 95) \times 10^{-6} \text{ м}^2$ размечалась на 15 площадок для измерения ЭМС.

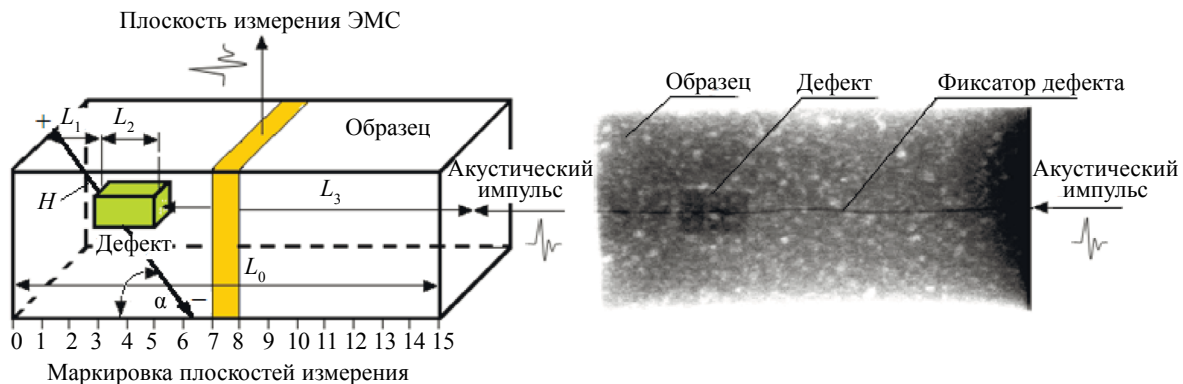


Рис. 1. Представление модельного образца из цементно-песчаной смеси с дефектом в нем при импульсном акустическом возбуждении (а) и рентгенограмма реального образца с дефектом из фторопласта (б).

На рисунке отмечены длина всего образца L_0 , расстояния от противоположной удару поверхности до дефекта L_1 , продольный размер дефекта L_2 и расстояние от дефекта до точки удара L_3 . На рис. 1б показано реальное расположение дефектов в образце, полученное с помощью цифровой рентгенографии с использованием детектора PerkinElmer XRD 0822 [22]. Для исследования влияния дефектов, в виде включений из твердотельных материалов с разным акустическим импедансом, на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии были изготовлены образцы с размещением в них дефектов определенной формы. Исследования проводились с различными твердотельными дефектами, механические и электрические характеристики которых размещены ниже в табл. 1. Использовались проводящие, полупроводящие и диэлектрические материалы с разным акустическим импедансом.

Как видно из таблицы, наряду с диэлектриками в качестве дефектов использовались металлы, обладающие высокой проводимостью, которая может обуславливать токи утечки. В результате поляризация и образование двойных электрических слоев на контактах материалов снизится, что приведет к существенному снижению амплитуды ЭМС при акустико-электрических преобразо-

Таблица 1

Акустические и электрические параметры используемых материалов

№ п.п.	Материал дефекта	Удельная плотность материала ρ_p , кг/м ³	Скорость продольного звука c_p , м/с	Акустический импеданс $z \cdot 10^6$, кг/с·м ²	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
1	Цементно-песчаная смесь (ЦПС) (влажность –1,5 %)	1900	2765	5,25	$4,0 \cdot 10^6$
2	Оргстекло (PMMA)	1200	2700	3,24	$10^{17} - 10^{18}$
3	Фторопласт (PTFE)	2200	1340	2,95	$10^{15} - 10^{17}$
4	Эбонит	1150	2400	2,76	$10^{12} - 10^{14}$
5	Стекло, флинт	2500	4560	11,4	$10^9 - 10^{12}$
6	Магнетитовая руда (75 %)	4150	5870	24,34	$10^{-3} - 10^2$
7	Дюралюминий, D16T	2700	6400	17,28	$2,8 \cdot 10^{-8}$
8	Латунь, L59	8500	4600	39,10	$6,5 \cdot 10^{-8}$
9	Сталь углеродистая	7800	5890	45,94	$1,3 \cdot 10^{-7}$

ваниях. Но если дефекты из проводящих материалов поместить в изолирующий материал, каким является затвердевшая цементно-песчаная смесь с удельным электрическим сопротивлением $10^4 - 10^5$ Ом·м, то токи утечки будут на уровне $10^{-5} - 10^{-6}$ А при приложенном к образцу напряжении 100 В. Более того, в модельных экспериментах удобно использовать проводники, потому что в них имеются свободные электроны, которые под действием электрического поля смещаются в соответствии с направлением его напряженности.

В настоящей работе приведены данные только с включениями в виде параллелепипеда из фторопласта и руды с 75 % содержанием магнетита. Кроме того, приведены параметры спектров электромагнитных сигналов при неизменных размерах образца, но с другими параметрами дефектов равные $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$ м³ из фторопласта и магнетитовой руды. Размеры дефекта выбирались таким образом, чтобы возбуждающий акустический импульс взаимодействовал с ним и имел достаточно низкий декремент затухания. Для дефекта с меньшими размерами необходим и более короткий акустический импульс. При изготовлении образцов соотношение песка и цемента составляло две весовые части к одной, соответственно, а водно-цементное соотношение составляло 0,7. Песок использовали с диаметром песчинок $(0,25 - 0,8) \times 10^{-3}$ м. Положение включения в образце контролировалось с помощью цифровой рентгенографии, которое показано на рис. 1б. Электрическое сопротивление R между электродами измерителя иммитанса LCR — 819 без дефекта на частоте 1,0 кГц составило $9,6 \times 10^7$ Ом, на частоте 10 кГц — $3,6 \times 10^7$ Ом, на частоте 100 кГц — $9,3 \times 10^6$ Ом. Измерения сопротивления проводили через середину торцевой площадки образца $(50 \times 50) \times 10^{-6}$ м³. Измерения в такой же геометрии электрического сопротивления образца из цементно-песчаной смеси с дефектом в виде включения из фторопласта $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$ м³ показали, что на частоте 1,0 кГц R равнялось $9,3 \times 10^7$ Ом, на частоте 10 кГц — $3,6 \times 10^7$ Ом, на частоте 100 кГц — $1,1 \times 10^7$ Ом. Погрешность измерения сопротивления составляла 0,05 %.

На рис. 2 приведена блок-схема стенда для возбуждения акустических импульсов в образцах и измерения параметров электромагнитных откликов на такое воздействие.

Акустическое импульсное возбуждение проводилось через торцевую поверхность образцов ударом шарика с помощью специального пружинного устройства [23]. Акустический импульс имел форму, близкую к колоколообразной, а длительность по основанию составляла 50×10^{-6} с, что соответствует основной гармонике 20 кГц. Этот импульс уверенно опознавал минимальную используемую в исследовании модельную неоднородность $(10 \times 10 \times 15) \times 10^9$ м³. Если осуществить возбуждение модельного образца акустическим импульсом длительностью 10^{-6} с, то можно определить минимальный размер дефекта при таком воздействии. Так при продольной скорости звука 3000 м/с размер контролируемого дефекта $L = 1,5 \times 10^{-3}$ м. Такая величина будет существенно ниже используемых дефектов в цементно-песчаной смеси и близок к размеру песчинок.

Энергию вводимого в образец акустического импульсного возбуждения определяли по скорости налета и отскока шарика. Скорости вычисляли по времени пролета шарика через две оптические пары, установленные на известном расстоянии в ограничительной трубке с внутренним

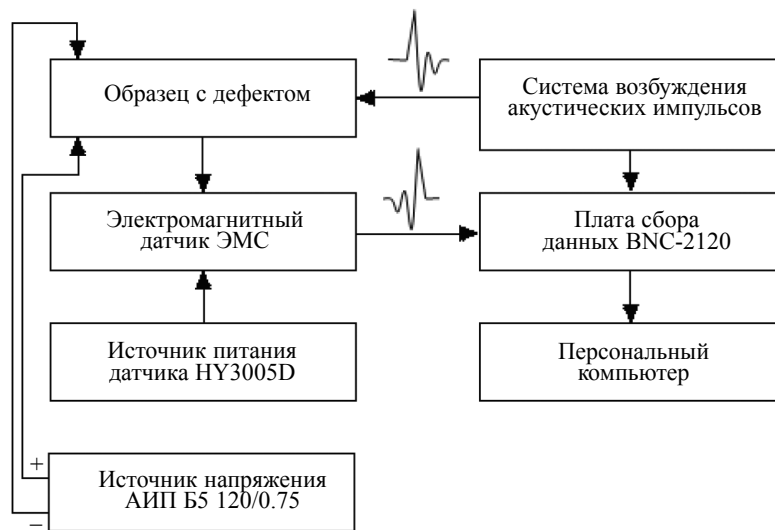


Рис. 2. Блок-схема стенда для детерминированного акустического возбуждения, регистрации и обработки электромагнитных сигналов.

диаметром 8×10^{-3} м. На стенде можно определять продольную скорость звука и декремент затухания возбуждающего акустического импульса. Удар шариком возможно заменять системой пьезоэлектрического возбуждения посредством широкополосного аperiодического пьезоэлектрического излучателя и импульсного генератора. Генератор выдает на выходе дискретно-импульсное напряжение 100, 200, 400, 600 и 800 В с длительностью (1,0; 5,0; 10,0; 50,0; 100,0) $\times 10^{-6}$ с [18].

Кроме того, на стенде имелась возможность размещать образцы в слабых электрических полях с напряженностью H от нуля до 2400 В/м. Полосчатый емкостной приемник ЭМС размером $(5 \times 30) \times 10^{-6}$ м² вместе с усилителем перемещали последовательно вдоль образца по измерительным площадкам (см. рис. 1а). При измерении параметров ЭМС в электрическом поле точечные электроды, создающие электрическое поле, сдвигали параллельно электромагнитному датчику. Конструкция точечных электродов позволяла менять угол наклона напряженности электрического поля по отношению к плоскости контакта цементно-песчаной смеси образца и материала дефекта. Для учета энергии введенного акустического импульса и регистрируемых параметров ЭМС использовали специализированную программу, обеспечивающую вывод на дисплей компьютера и запоминание амплитудно-частотных спектров электромагнитных сигналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было выполнено численное моделирование и исследование, с использованием аппарата механики сплошных сред процессов распространения упругих волн в диэлектрическом образце при импульсном воздействии.

Вычислительный алгоритм для определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) модельного образца при импульсном акустическом возбуждении построен на соотношениях механики деформированного тела с использованием конечно-разностных соотношений.

В общем случае система уравнений, описывающая поведение деформируемого твердого тела в пространственном случае, включает в себя уравнения движения:

$$\rho U'_i = \rho G_i + \sigma_{ij,j}; \quad (1)$$

уравнения неразрывности:

$$V'/V - U_{i,j} = 0; \quad (2)$$

соотношения для компонент тензора скоростей полных деформаций:

$$\epsilon'_{i,j} = \frac{1}{2}(U_{i,j} + U_{j,i}); \quad (3)$$

определяющие соотношения, задающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}); \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta x_{ij}}{x_{ij}}. \quad (5)$$

В выражениях (1)–(5): x_{ij} — пространственные координаты; $U_i = x'_i$ — компоненты вектора скорости; $V = \rho_0 / \rho$ — удельный относительный объем материала; ρ_0, ρ — начальная и текущая плотности; G_i — компоненты вектора массовых сил; ε_{ij} — компоненты тензора полной деформации.

В формулах штрих над символом означает производную по времени, запятая после индекса — производную по соответствующей координате, по повторяющимся индексам производится суммирование. Численная реализация проводилась с использованием нецентральной разностной схемы второго порядка точности относительно шагов по пространству и времени [24]. Корректность численных результатов оценивалась как по внутренней сходимости результатов при изменении параметров конечно-разностной сетки и шагов интегрирования по времени, так и проведенными авторами расчетами модельных задач [25]. В трехмерном случае по пространственным переменным относительно просто построить нецентральную схему второго порядка для системы гиперболических уравнений, основанную на двух шаговой формуле для каждого из уравнений вида:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial X} + H. \quad (6)$$

Соответствующая разностная схема выглядит следующим образом:

$$U_{n+\alpha_1}^{(1)} = U_n + \alpha_1 \Delta t U'_n; \quad (7)$$

$$U_{n+1} = U_n + w_0 \Delta t U'_n + w_1 \Delta t U_{n+\alpha_1}^{(1)}. \quad (8)$$

Верхний индекс обозначает величину, вычисленную в данный момент времени, указанный нижним индексом. В результате получим:

$$U_i^{(1)} = U_i^n - \alpha_1 \Delta t \left[(1 - \varepsilon \nabla) \left(\frac{\Delta F_i^n}{\Delta X} \right) + H_i^n \right]; \quad (9)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n - w_0 \Delta t \left[(1 + k \nabla) \left(\frac{\Delta F_i^n}{\Delta X} \right) + H_i^n \right] - w_1 \Delta t \left[(1 - \varepsilon \Delta) \left(\frac{\Delta F_i^{(1)}}{\Delta X} \right) + H_i^{(1)} \right], \quad (10)$$

где верхний индекс обозначает момент времени, а нижний — пространственную координату. Предиктор $U_i^{(1)}$ вычисляется в момент $(n + \alpha_1) \Delta t$. В этих соотношениях используются обозначения: Δt — шаг по времени и ΔX — шаг по пространству, ∇ — оператор Гамильтона.

Расчетная область разбивается на конечные элементы сеткой. Сетка регулярная, то есть используются равные по размеру конечные прямоугольные элементы. Используемая схема типа крест является нецентральной схемой, так как значения функций вычисляются в узлах сетки. К преимуществу нецентральных схем относят и отсутствие полуцелых индексов, что делает более простой реализацию граничных условий. Схема имеет второй порядок аппроксимации по пространственным и временным переменным. В реализованной схеме используем на свободных границах условия в перемещениях, а на границах, реализующих опорные реакции, — в смешанном виде, когда задаются и перемещения, и напряжения.

Граничные условия соответствуют лабораторному эксперименту. На боковой границе задавалось нулевое смещение, так как образец зажимался в струбцине. Большие грани свободны, поэтому напряжения на границе равны нулю. На боковой границе задавалась нагрузка в виде нарастающей и затем убывающей функции, имеющая зависимость от времени и пространственных координат. Импульс возбуждения соответствовал экспериментальному акустическому возбуждению по форме, амплитуде и длительности. Длительность приложенной нагрузки в расчетах составляла величину $t_0 = 50 \times 10^{-6}$ с, что соответствует эксперименту.

Результаты решения механической задачи визуализировали в виде трехмерных областей распределения продольных смещений для детального анализа волнового процесса, который необходим на данной стадии работы. Для сравнения с экспериментальными измерениями проводили расчет распространения напряжений акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика в структуре из цементно-песчаной смеси с диэлектрическим дефектом в виде фторопласта и 75 %-й магнетитовой руды размером $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$, $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ и $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$. Удельное акустическое сопротивление цементно-песчаной смеси составлял $z_{\text{цпс}} = (\rho c)_{\text{цпс}} = 5,25 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, где $\rho_{\text{цпс}} = 1900 \text{ кг/м}^3$ — плотность смеси, а $c_{\text{цпс}} = 2765 \text{ м/с}$ — скорость продольного звука в нем. При этом удельное акустическое сопротивление фторопластового дефекта отличался почти в 2 раза и составлял $z_{\text{ф}} = (\rho c)_{\text{ф}} = 2,95 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, где $\rho_{\text{ф}} = 2200 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{ф}} = 1340 \text{ м/с}$. У магнетитовой руды удельное акустическое сопротивление было существенно выше $z_{\text{мр}} = (\rho c)_{\text{мр}} = 24,34 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, где $\rho_{\text{мр}} = 4150 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{ф}} = 5870 \text{ м/с}$. В расчетах принималось, что прочностные свойства материала образца справочные. Импульсная нагрузка, как уже отмечалось выше, прикладывалась по центру нормально боковой грани образцов площадью $(50,0 \times 50,0) \times 10^{-6} \text{ м}^2$.

При расчетах использовали линейные геометрические соотношения Коши, связывающие деформации и перемещения, и линейные физические соотношения между напряжениями и деформациями. Уравнения равновесия также принимались в стандартном для плоских постановок виде.

При распространении акустического импульса по модельной системе образцов со вставкой изменялось и ее напряженно-деформированное состояние (НДС). Результаты расчетов визуализируются в виде трехмерных волновых областей, иллюстрирующих распространение упругих возмущений в модельной системе образцов с дефектом.

На рис. 3 показано распространение упругого возмущения, приложенного к модельному образцу в виде параллелепипеда из цементно-песчаной смеси размером $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ с дефектом из фторопласта величиной $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$. На рисунке видно, как фронт волны огибает включение размером $25 \times 25 \times 38 \text{ мм}$. При этом часть возмущений отражается, а другая проходит дальше в соответствии с соотношениями акустического импеданса цементно-песчаной смеси и материала дефекта.

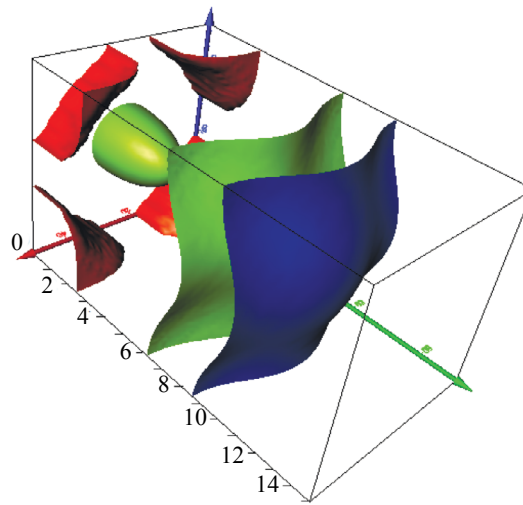


Рис. 3. Распределение изоповерхностей, демонстрирующих распределения смещений разного уровня по модельному образцу $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ с дефектом из фторопласта величиной $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ в момент времени $25 \times 10^{-6} \text{ с}$ после начала приложения акустического импульса.

В результате возникают колебания в килогерцовой области спектра. Необходимо отметить, что частотный спектр, очевидно, связан с деформационно-прочностными характеристиками материала образца и дефекта. Волновой фронт, распространяясь в материале модельного образца, достигает область с отличающимися от основного материала упругими свойствами, частично отражается от границы. Одновременно с этим в соответствии с акустическим импедансом материалов образца и дефекта происходит частичное огибание акустической волной твердотельного включения. Известно, что в однородной среде волна распространяется сферически. В неоднородной среде волновой фронт имеет сложную форму из-за серии многократных отражений как от неоднородности, так и

от боковых стенок. Наличие в образце дефектов в виде небольших включений не отражается на волновом процессе. Если рассматривать образцы с включениями при больших длительностях приложенного импульса, то волновой процесс проходит без видимых изменений.

Были проведены расчеты для образца из цементно-песчаной смеси с включениями, характеристики которых задавалась в численном эксперименте в виде области с упругими свойствами, отличающимися от основного массива образца. В расчетах использовалась модель образца, представленная на рис. 1. Возбуждение производили точечным источником в виде удара шариком по схеме, показанной на рис. 2. Акустические возмущения имели вид сферических волн, которые приводили в движение двойные электрические слои на границах раздела сред. На рис. 4 приведены результаты расчетов изменения НДС в двумерном пространстве в образце с дефектами из фторопласта (рис. 4а) и магнетитовой руды (рис. 4б). Рассматривая результаты расчета для различных материалов включения и их размеров, разницу в параметрах НДС сложно оценить. Основные различия в волновых процессах наблюдаются на границах раздела материала. На рис. 4а и б представлены данные расчета на границе дефекта и основного материала образца.

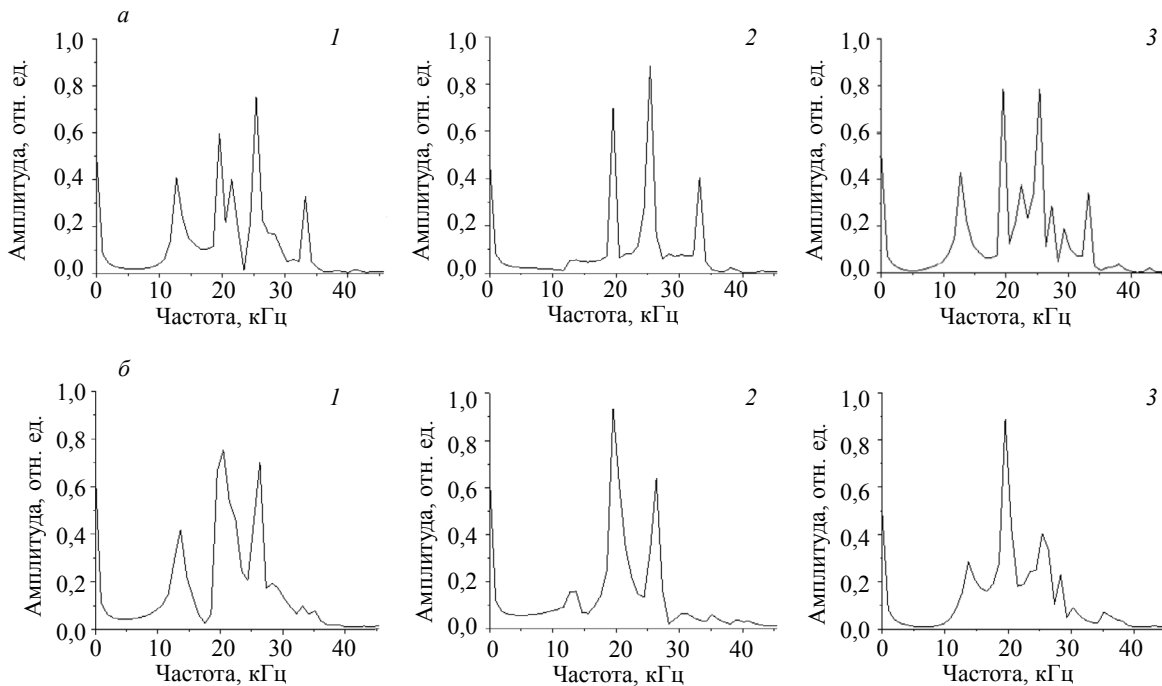


Рис. 4. Изменения спектра расчетных электромагнитных сигналов образца цементно-песчаной смеси с дефектами размером $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ из фторопласта (а) и 75 % магнетитовой руды (б) в разных поперечных сечениях относительно расстоянии от поверхности, противоположной вводу акустического импульса:

1 — $3,0 \times 10^{-3} \text{ м}$; 2 — $3,0 \times 10^{-2} \text{ м}$; 3 — $8,0 \times 10^{-2} \text{ м}$.

При схожих параметрах основного материала и включения разница в волновых процессах может быть оценена только на основе расчетных данных параметров, связанных с электрическим откликом. Это становится возможным с использованием построенной математической модели, которая представлена в работе [19]. В ней показано, что изменения НДС при распространении акустического импульса согласуются с параметрами ЭМС в каждой части исследуемого образца.

Акустические импульсы при своем распространении взаимодействуют с имеющимися и вновь возникшими дефектами. В результате такого воздействия заряды или двойные электрические слои на границах раздела сред, включений или блоков, на дефектах структуры диэлектрических материалов излучают электромагнитные сигналы [26, 27]. Интенсивность излучения определяется вектором Умова—Пойнтинга [26].

Регистрация ЭМС в реальных условиях эксперимента осуществлялась с помощью емкостного датчика, который устанавливался около одной из наибольших граней образца. Для увеличения соотношения ЭМС/шум на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 2, сначала исследовали влияние приложенного электрического поля на параметры электромагнитного отклика при им-

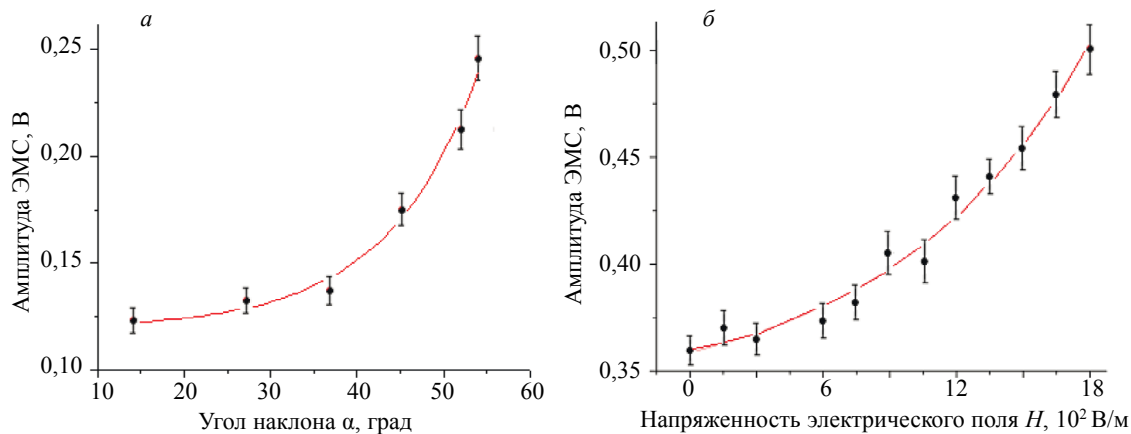


Рис. 5. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала: от угла наклона α вектора напряженности электрического поля H по отношению к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта из фторопласта с размерами $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ (а); то же при увеличении напряженности приложенного электрического поля и постоянном $\alpha = 45^\circ$ (б).

пульсном акустическом воздействии. С этой целью изменяли угол α наклона вектора напряженности электрического поля к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта (см. рис. 1а), а также величину напряженности поля до $H = 1800 \text{ В/м}$. При направлении напряженности электрического поля перпендикулярно распространению продольных акустических импульсов амплитуда электромагнитного сигнала практически не изменялась. Максимальные изменения электромагнитного отклика наблюдались при распространении акустического импульса вдоль направления напряженности электрического поля и перпендикулярно контакту ЦПС и дефекта. Это обусловлено максимальной поляризацией в приложенном электрическом поле контакта материалов образца и дефекта. На рис. 5а показано влияние угла наклона α напряженности электрического поля на амплитуду электромагнитного отклика на измерительной площадке, находящейся напротив контакта ЦПС и дефекта. Надо отметить, что при увеличении угла наклона и постоянной величине напряжения на электродах уменьшается величина H от 2400 до 1400 В/м из-за возрастания расстояния между ними. На рис. 5б приведена зависимость амплитуды ЭМС от величины напряженности электрического поля при неизменном угле наклона $\alpha = 45^\circ$ по отношению к контакту материала образца и торца дефекта из фторопласта, расположенного перпендикулярно распространения акустического импульса, а на рис. 6 — с дефектом из магнетитовой руды.

Здесь для возбуждения акустического импульса в образце использовали удар шариком. Контролируемые поверхности контактов располагались перпендикулярно распространению акустического импульса. На рис. 5б и рис. 6 видно, что амплитуда ЭМС увеличивается при нарастании напряженности приложенного к образцу электрического поля.

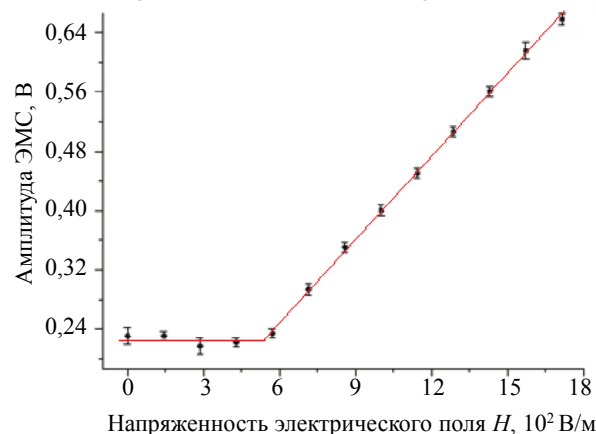


Рис. 6. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала при постоянном угле наклона α вектора напряженности электрического поля H по отношению к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта из магнетитовой руды с размерами $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$.

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований было установлено возрастание амплитуды ЭМС с увеличением угла вектора напряженности электрического поля относительно контакта материалов образца и дефектов. Причем при неизменном угле наклона было выявлено нарастание амплитуды ЭМС при изменении напряженности поля в интервале от нуля до $18,0 \times 10^2$ В/м.

Как уже отмечалось выше, при разработке акустико-электрического метода контроля дефектности диэлектрических материалов важным является знание их акустических и электрических свойств. В табл. 1 приведены параметры для вмещающей цементно-песчаной смеси и материалов модельных дефектов с разными акустическими и электрическими свойствами.

На рис. 7 показан результат измерения акустико-электрических преобразований в образце, имеющем включение в виде дефекта из фторопласта (ПТФЭ). Продольная скорость звука в ПТФЭ равна 1340 м/с при плотности $\rho_{\text{ф}} = 2200$ кг/м³.

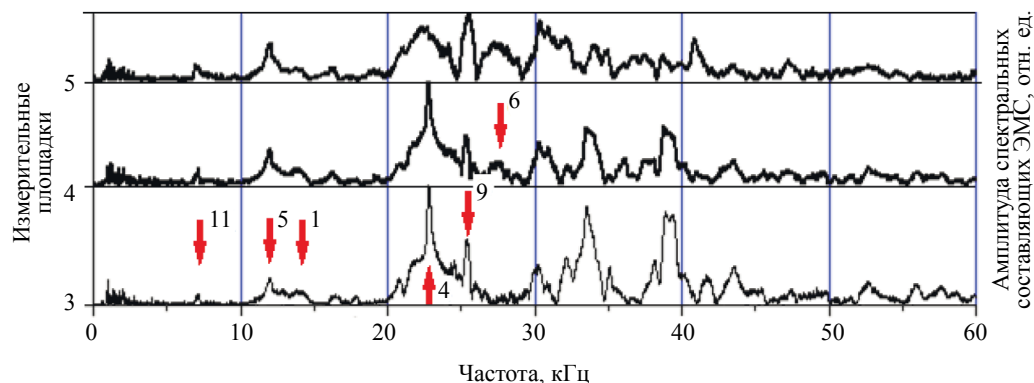


Рис. 7. Спектры ЭМС на разных измерительных площадках модельного образца ЦПС с дефектом из фторопласта при возбуждении детерминированным акустическим импульсом.

Акустический импеданс цементно-песчаной смеси (ЦПС) образца имеет значение $z_{\text{цпс}} = 5,25 \cdot 10^6$ кг/м²·с, что почти в два раза больше, чем у ПТФЭ, который соответствует значению $z_{\text{ф}} = 2,95 \cdot 10^6$ кг/м²·с. Дефект размером $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$ м находился на уровне измерительных площадок 3, 4 и частично 5. Введение акустического импульса проводили со стороны измерительной площадки № 15.

На рис. 7 видно, что на дальней от удара измерительной площадке № 3 наибольшая амплитуда спектральных составляющих ЭМС. Это указывает на присутствие в районе этой площадки начала дефекта в объеме образца. Данные по параметрам спектральных составляющих ЭМС с других измерительных площадок здесь не приведены, так как они существенно меньше по амплитуде и не имеют упорядоченности. Распространение вводимого акустического импульса по длине образца L_0 соответствует спектральной составляющей ЭМС 14,55 кГц. На рис. 7 эта частота обозначена стрелкой 1. Другие рассчитанные и приведенные в табл. 2 частоты также соответствуют спектральным составляющим ЭМС. На рисунке они обозначены теми же цифрами, что и в табл. 2. Выделенные на рис. 7 стрелками частоты являются определяющими для выявления местоположения дефекта.

В табл. 2 приведены результаты расчетов спектральных составляющих ЭМС в модельном образце из цементно-песчаной смеси с дефектом из фторопласта при возбуждении детерминированным акустическим импульсом.

Идентичность параметров возбуждающих образец акустических импульсов отслеживалась по скорости налета шарика на ударную поверхность. Расчет частот производили по формуле $f_i = c_l / 2L_i$, где f_i — частотная составляющая спектра ЭМС; c_l — продольная скорость звука в основном материале модельного образца или дефекта; L_i — длина отрезка образца, по которому распространяется акустический импульс. Увеличение дефекта при неизменных размерах образца приводит к изменению спектра и появлению высокочастотных спектральных составляющих ЭМС. На рис. 8 приведены спектры частот, полученные при измерении ЭМС для образцов с дефектами из фторопласта разных размеров: $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$; $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9}$ и $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$ м³. При этом задняя граница дефекта находилась на одном расстоянии от торца образца, противоположного вводу акустического импульса при ударе шариком. Измерения всегда проводились на всех выделенных площадках образца от № 1 до № 15 (см. рис. 1а). На рис. 8 приведены электромагнитные

Таблица 2

Результаты расчетов спектральных составляющих ЭМС в модельном образце из цементно-песчаной смеси с дефектом из фторопласта

№ п.п.	Отрезки образца, 10^{-3} м	Время двойного прохождения акустического импульса, 10^{-6} с	Частота спектра ЭМС, 10^3 Гц	Продольная скорость звука c_p , м/с	Материал
1	$L_0 = 95$	68,70	14,55	2765	ЦПС
2	$L_1 = 20$	14,47	69,10	2765	ЦПС
3	$L_2 = 15$	22,39	44,67	1340	ПТФЭ
4	$L_3 = 60$	43,47	23,00	2765	ЦПС
5	$L_0 + L_1$	83,30	12,00	2765	ЦПС _{0,1}
6	$L_1 + L_2$	36,86	27,10	$2765_1, 1340_2$	ЦПС ₁ , ПТФЭ ₂
7	$L_3 + L_2$	65,86	15,18	$2765_3, 1340_2$	ЦПС ₃ , ПТФЭ ₂
8	$L_1 + L_2 + L_3$	80,34	12,45	$2765_{1,3}, 1340_2$	ЦПС _{1,3} , ПТФЭ ₂
9	$L_0 + L_1 - L_3$	39,83	25,11	$2765_{0,1,3}$	ЦПС _{0,1,3}
10	$L_0 - L_3$	25,23	39,64	$2765_{0,3}$	ЦПС _{0,3}
11	$L_0 + L_1 + L_2 + L_3$	149,16	6,7	$2765_{0,1,3}, 1340_2$	ЦПС _{0,1,3} , ПТФЭ ₂

сигналы, регистрируемые на измерительных площадках, соответствующих контакту материалов образца и дефекта, расположенного вблизи поверхности, через которую вводили акустический импульс.

Расчет частот ЭМС (рис. 8) с помощью программы БПФ показал, что наибольший пик спектра соответствует поперечному размеру образца равному $5,0 \times 10^{-2}$ м. Стрелками указаны частоты, связанные с разными размерами дефектов из фторопласта. Как уже отмечалось выше, эти частоты связаны с уменьшением расстояния между дефектом и основными поверхностями образца, размеры которого остаются неизменными. В результате, частота ЭМС на участках, соответствующих длине дефекта, возрастает, что и выявлено в экспериментальных измерениях. При измерениях ЭМС наблюдали изменения спектра в зависимости от места сканирования.

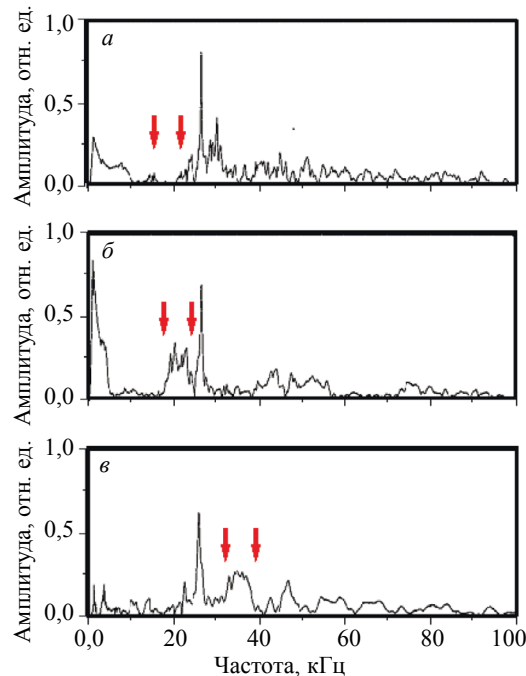


Рис. 8. Изменения спектра электромагнитных сигналов образца цементно-песчаной смеси с дефектами из фторопласта разных размеров:

a — $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$ м³; b — $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9}$ м³; v — $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$ м³.

На противоположной от удара площадке в спектре наблюдается преобладание низкочастотной составляющей. В то же время в других местах преобладает высокочастотная составляющая. Это объясняется сформированной дефектом сложной волновой картиной НДС, которая оказывает влияние на частотный спектр регистрируемого электромагнитного сигнала.

ВЫВОДЫ

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований было установлено возрастание амплитуды ЭМС с увеличением угла вектора напряженности электрического поля относительно контакта материалов образца и дефектов. Причем при неизменном угле наклона было выявлено нарастание амплитуды ЭМС при изменении напряженности поля в интервале от нуля до 18×10^2 В/м. Такое возрастание обусловлено увеличением поляризации поверхностей контактов материалов образца и дефектов в виде твердотельных включений. Приложение электрического поля существенно улучшает соотношение амплитуды ЭМС/шум.

В результате моделирования установлено соответствие амплитуд электромагнитных откликов на определенное расчетным путем распределение во времени и пространстве механических напряжений, возникающих в дефектной системе при распространении акустического импульса. Показано, что параметры электромагнитных сигналов отображают распределение параметров возбуждающего акустического импульса в разных частях объема контролируемого образца, на которое оказывает влияние соотношение акустического импеданса материалов образца и дефекта. Увеличение дефекта при неизменных размерах образца приводит к изменению спектра и появлению высокочастотных спектральных составляющих ЭМС. Кроме того, по спектрам ЭМС возможно определение местонахождения диэлектрического дефекта в диэлектрическом материале.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 19-19-00178.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Physical Acoustics (edited by W.P. Mason). V. 1. New York: Academic Press, 1964. 532 p.
2. Ключев В.В. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т. М.: Машиностроение, 2008.
3. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer, 1997. 261 p.
4. Ida N. Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation. London: Chapman & Hall edition, 1995. 511 p.
5. Михеев М.Н., Горкунов Е.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 266 с.
6. Francesco Ficilli. Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 140 p.
7. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. М.: Атомиздат, 1974. 510 с.
8. Неразрушающий контроль / Под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 4. М.: Высшая школа, 1992. 321 с.
9. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. 1981. Т. 256. № 4. С. 824—826.
10. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Баумбах Х., Канпхан Г., Словик В., Биркхольц В. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 76—80.
11. Rabinovitch A., Frid V., Goldbaum J., Bahat D. Polarization-depolarization process in glass during percussion drilling // Philosophical Magazine. 2003. V. 83. No. 25. P. 2929—2939.
12. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuella A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A. Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes // Strain. 2010. V. 47. P. 144—152.
13. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.A., Yavorovich L.V. Study of Mechanoelectrical Transformation in Rocks Under Dynamic Impact // Non-Ferrous Metals. 2007. № 1. P. 9—12.
14. Мирошниченко М.И., Куксенко В.С. Излучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. № 5. С. 1531—1534.
15. O'Keefe, S.G., Thiel D.V. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials // Phys. Earth and Planet. Inter. 1995. V. 89. No. 11. P. 127—135.
16. Petrenko V.F. On the nature of electrical polarization of materials caused by cracks, application to ice // Philosophical Magazine B. 1993. V. 67. No. 3. P. 301—315.
17. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 6245—6249.
18. Bepal'ko A.A., Shtirts V.A., Fedotov P.I., Chulkov A.O., Yavorovich L.V. Modelling of Infrared Glow in Rock Holes // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 29—30.
19. Bepal'ko A.A., Isaev Y.N., Yavorovich L.V. Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures // Journal of Mining Science. 2016. Т. 52. № 2. С. 279—285.

20. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Диагностика развития деструктивных зон в образцах горных пород при одноосном сжатии по спектральным характеристикам электромагнитных сигналов // Дефектоскопия. 2011. № 10. С. 41—49.
 21. Фурса Т.В., Уцын Г.Е., Данн Д.Д., Петров М.В. Перспективы развития неразрушающего метода контроля гетерогенных неметаллических материалов по параметрам электрического отклика на ударное воздействие // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 24—30.
 22. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822. [Electronic resource]
 23. Беспалько А.А., Федотов П.И., Яворович Л.В. Исследование и контроль намагниченности образцов магнетитовой руды по параметрам электромагнитного сигнала // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 221—224.
 24. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы II и III порядка точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11. № 2. С. 76—85.
 25. Барашков В.Н., Герасимов А.В., Люшкин Б.А. Прогнозирование разрушения промышленных установок // Химическая промышленность. 1998. № 10. С. 657—661.
 26. Landau L.D., Lifshits E.M. Electrodynamics of continuous media. Great Britain: Bristol, 1963. V. 8. 474 p.
 27. Вишневская Н.Л., Защинский Л.А. Расчет напряженности самосогласованного электрического поля, возникающего в диэлектрике при механическом напряжении // Известия ВУЗов. Физика. 1977. № 5. С. 71—74.
-