

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 620.179.18; 620.192

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.008

## **ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**Анатолий Алексеевич Беспалько<sup>1†</sup>, Денис Дмитриевич Данин<sup>2</sup>, Цзюньхуа Ло<sup>3</sup>,  
Павел Иванович Федотов<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, 634050, Томск, Россия

<sup>1</sup> besko48@tpu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-2374-9981>

<sup>2</sup> dddann@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0382-8017>

<sup>3</sup> lulubvv@foxmail.com

<sup>4</sup> pif@tpu.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований характеристик и параметров механико- и акустико-электрических преобразований. Изучены закономерные связи характеристик электромагнитной эмиссии и параметров электромагнитных сигналов при образовании трещин и наличия слоистости структуры твердотельных диэлектрических материалов при детерминированном импульсном акустическом воздействии. Приведены экспериментальные результаты влияния зарядового состояния слоистых структур на параметры электромагнитных сигналов. На примере сложной структуры неметаллических образцов горных пород приведены закономерности изменений характеристик электромагнитной эмиссии. Используя эти закономерности, показана возможность определять этапы развития разрушения при непрерывном одноосном нагружении сжатием до разрушения образца, в том числе этап образования и развития деструктивной зоны. Изучены закономерности изменения параметров акустико-электрических преобразований при внешних детерминированных импульсных воздействиях на исследуемые естественные и модельные диэлектрические структуры при ступенчатом нагружении одноосным сжатием. Анализируются особенности каждого из используемых методов применительно к контролю процессов развития разрушения.

**Ключевые слова:** механико- и акустико-электрические преобразования, контроль развития разрушения, твердые диэлектрики.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-10156.

---

**Для цитирования:** Беспалько А.А., Данин Д.Д., Ло Ц., Федотов П.И. Особенности акустико-электрических методов мониторинга разрушения твердых диэлектриков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 352–364. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.008.

---

Original article

## **FEATURES OF ACOUSTIC-ELECTRICAL METHODS FOR MONITORING THE DESTRUCTION OF SOLID DIELECTRICS**

**Anatoly A. Bespal'ko<sup>1†</sup>, Denis D. Dann<sup>2</sup>, Junhua Luo<sup>3</sup>, Pavel I. Fedotov<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia

<sup>1</sup> besko48@tpu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-2374-9981>

<sup>2</sup> dddann@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0382-8017>

<sup>3</sup> lulubvv@foxmail.com

<sup>4</sup> pif@tpu.ru

**Abstract.** The article presents the results of studies of the characteristics and parameters of mechanical and acoustic-electrical transformations. The regular relationships between the characteristics of electromagnetic emission and the parameters of electromagnetic signals during the formation of cracks and the presence of layered struc-

ture of solid-state dielectric materials under deterministic pulsed acoustic action are studied. Experimental results of the influence of the charge state of layered structures on the parameters of electromagnetic signals are presented. Using the example of the complex structure of nonmetallic rock samples, the patterns of changes in the characteristics of electromagnetic emission are given. Using these patterns, it is shown that it is possible to determine the stages of the development of destruction under continuous uniaxial compression loading before the destruction of the sample, including the stage of formation and development of the destructive zone. The regularities of changes in the parameters of acoustic-electrical transformations under external deterministic pulse effects on the studied natural and model dielectric structures under step loading by uniaxial compression are studied. The features of each of the methods used in relation to the control of the processes of destruction development are analyzed.

**Keywords:** mechanical and acoustic-electrical transformations, testing of the development of destruction, solid dielectrics.

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 20-79-10156.

**For citation:** Bepaпaл'ko, A. A., Dann, D. D., Luo, J. & Fedotov, P. I. (2023). Features of acoustic-electrical methods for monitoring the destruction of solid dielectrics. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 352–364. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.008.

## Введение

С развитием химических технологий все большее количество и разновидностей диэлектрических материалов и гетерогенных структур на их основе используется в изделиях, эксплуатируемых при механических нагрузках, в том числе в электрических и магнитных полях. При разнородных механических нагрузках конкретного материала происходит развитие дефектов, образующихся при его изготовлении. Кроме того, такие нагрузки способствуют появлению новых дефектов в виде воздушных полостей, расслоений и микротрещин, которые, в конечном итоге, способствуют разрушению изделий.

В настоящее время для тестирования дефектности и развития разрушения в металлических и гетерогенных диэлектрических материалах и конструкциях на практике применяют уже зарекомендовавшие себя неразрушающие методы контроля (НК). К ним относятся акустические [1, 2], рентгеновские [3], электрические и электромагнитные [4, 5], магнитные [6], ударно-термографические [7] и другие методы [1, 2]. В некоторых случаях использование перечисленных методов НК для контроля дефектности диэлектрических структур становится неэффективным для изделий с близким акустическим импедансом дефекта и вмещающего материала. В целях техногенной безопасности выявление структурных неоднородностей в виде слоистости или инородных локальных включений становится важным при определении механической или электрической прочности используемых на практике диэлектрических материалов. Такие материалы применяются в электрических изоляторах, в диэлектрических конструкциях, работающих под различ-

ными механическими нагрузками, в бетонных и других изделиях. Поэтому актуальным является разработка новых комплексных методов тестирования уже имеющихся дефектов, а также мониторинга развития разрушения диэлектрических материалов под воздействием механической нагрузки.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что комплексные методы неразрушающего контроля могут быть разработаны на основе механико-электрических (МЭП) и акустико-электрических (АЭП) преобразований [8-14]. Такие методы могут быть успешно использованы на практике. Развитие разрушения диэлектрических материалов приводит к зарядению бортов вновь образованных трещин и полостей разного размера. В результате на вновь возникающих или имеющихся дефектах происходит образование двойных электрических слоев (ДЭС). В процессе трещинообразования высвобождается также энергия в виде акустических импульсов. В результате воздействия этих импульсов на рядом расположенные двойные электрические слои происходит возбуждение электромагнитных сигналов (ЭМС). В этом случае ЭМС генерируются за счет внутренних процессов разрушения и МЭП. Электромагнитные отклики могут генерироваться в результате акустико-электрических преобразований в виде ЭМС и при внешнем импульсном акустическом воздействии. В этом случае производят контактное зондирование дефектности или развития разрушения импульсным детерминированным акустическим импульсом. Прием электромагнитного отклика на такое воздействие осуществляется в отсутствии контакта с тестируемым материалом или изделием [15 18]. Отсутствие контакта при регистрации ЭМС да-

ет определенные преимущества над известными акустическими методами тестирования дефектности материалов [1, 2]. В работе [19] приведены расчеты тока смещения и генерации ЭМС при нормированном однократном ударном возбуждении акустических колебаний в диэлектрическом материале. При этом амплитудно-частотные параметры ЭМС будут определяться диэлектрическими свойствами и зарядовым состоянием контакта вмещающего материала и дефекта, а также характеристиками воздействующего акустического импульса (АИ). В работах [20] на примере образцов магнетитовой руды, скарнов и мрамора показано влияние текстуры и размеров зерен в тестируемых образцах.

В настоящей статье проводится численное и экспериментальное моделирование закономерных связей характеристик импульсного акустического воздействия и параметров электромагнитного отклика (ЭМО) диэлектрических дефектных и слоистых твердотельных структур. В работах [12, 15-18] обосновано, что АЭП являются одним из основных способов возбуждения ЭМС в диэлектрических материалах со сложной текстурой. В статье приведены численные расчеты взаимодействия детерминированных АИ с трещинами разной длины и расположения в образце. Приводятся также результаты экспериментальных исследований влияния зарядового состояния тестируемых слоистых образцов на параметры ЭМС. Кроме того, показаны результаты экспериментальных исследований, характеризующих отличия изменений характеристик ЭМЭ и параметров

ЭМС в процессе одноосного сжатия образцов до разрушения.

### Образцы и методы исследования

Для выявления закономерностей влияния двойных электрических слоев на параметры ЭМС при АЭП целесообразно использовать модельные диэлектрические образцы со вставкой, имитирующие слоистость, и образцы горных пород со сложной текстурой и структурой. Использование при численных расчетах и в экспериментальных исследованиях образцов горных пород обусловлено неразрывным контактом составляющих их минералов. Из горных пород использовались: полосчатый серпентинит; хризотил-асбест и серпентин; магнетитовая руда и скарн. Образцы серпентинита, серпентина и хризотил-асбеста изготавливались в виде параллелепипеда с размерами  $(6,0 \cdot 3,5 \cdot 2,4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , а образцы руды и скарна имели продольный размер  $(80 \pm 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и диаметр  $(42 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Состав образцов горных пород определяли с помощью рентгеновского дифрактометра X'TRA после их разрушения [21]. Для определения влияния слоистости образцов на параметры ЭМС при импульсном акустическом воздействии численно и экспериментально исследовались модели, состоящие из двух одинаковых кристаллов кварца размером  $(6,0 \cdot 4,0 \cdot 3,0) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  и прослойки из оргстекла (ПММА) разной толщины. Акустические и электрические параметры исследуемых материалов представлены в Таблице 1.

**Таблица 1.** Акустические и электрические характеристики горных пород и ПММА [21, 22]

**Table 1.** Acoustic and electrical characteristics of rocks and PMMA [21, 22]

№ п.п.	Материал образцов	Удельная плотность материала, $\rho_v, \text{ кг/м}^3$	Скорость продольного звука, $c_l, \text{ м/с}$	Акустический импеданс, $z \cdot 10^6, \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$	Удельное электрическое сопротивление, $\rho_{эс}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
1	Магнетитовая руда (75 %)	4150	5870	24,36	$10^2 - 10^{-2}$
2	Сиенитовый скарн	4500	6500	29,25	$10^6 - 10^7$
3	Кальцит	2710	6700	18,16	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{12}$
4	Кварц кристаллический	2650	6520 (ось x)	17,28	$10^{12} - 10^{14}$
5	Оргстекло (ПММА)	1200	2670	3,20	$10^{16} - 10^{18}$
6	Серпентинит	2500	5560 (вдоль волокон хр/асб)	13,90	$10^6 - 10^7$
7	Хризотил-асбест (хр/асб)	2500	4110 (вдоль волокон хр/асб)	10,28	$10^8 - 10^9$
8	Серпентин	2600	6640	17,26	$2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$
9	Затвердевшая цементно-песчаная смесь	1900	2765	5,25	$38,4 \cdot 10^3$

Для измерения величины поверхностного заряда в материалах со сложной структурой и текстурой использовали вибрационный метод, включающий метод электростатической индукции [23]. В качестве основного параметра в этом методе является величина воздушного зазора между вибрирующим электродом и диэлектрическим образцом. При этом в электрической цепи с электродами фиксируется ток  $I$ . В случае использования синусоидальных колебаний зазора ток в цепи будет изменяться по формуле

$$I = I_0 + \Delta I \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота колебаний вибрирующего электрода,  $I_0$  – исходная величина зазора,  $\Delta I$  – амплитуда смещения подвижного электрода относительно  $I_0$ . Возрастание или уменьшение  $\Delta I$  приведет к появлению переменного тока, который регистрируется с помощью гальванометра. Величину этого тока можно найти как

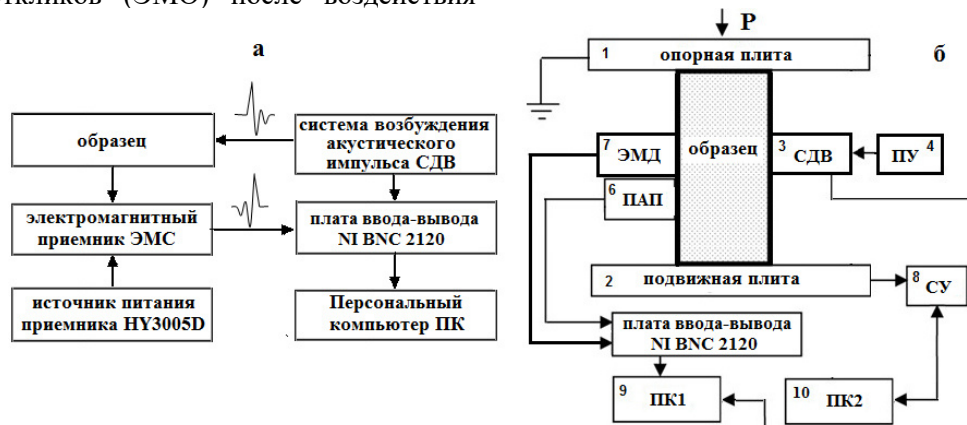
$$I = K \omega \Delta l \sigma \cos \omega t. \quad (2)$$

В выражении для переменного тока (2) величина коэффициента  $K$  зависит от размеров диэлектрика и его диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , а также от расстояний  $l_0$  и  $\Delta l$  между электродом и тестируемым материалом.

Для определения влияния внутренней текстуры материалов на параметры акустико-электрических преобразований в них при внешнем воздействии детерминированными акустическими импульсами использовали стенд, представленный на рис.1а. Стенд включает в себя: систему динамического возбуждения (СДВ) акустических импульсов в исследуемом образце; электромагнитный приемник электромагнитных откликов (ЭМО) после воздействия

АИ; источник электрического питания схемы усиления приемника ЭМС; плата сбора и вывода NI BNC 2120 данных измерений параметров АИ и ЭМС; компьютер для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных.

Исследования развития деструкции образцов при одноосном сжатии, в том числе с внешним акустическим воздействием в процессе ступенчатого нагружения, использовали стенд, схема которого показана на рис.1б. На обоих стендах вводимый в образец детерминированный акустический импульс создавался ударом стального шарика. Амплитуда возбуждаемого АИ определялась коэффициентом сжатия пружинного устройства ПУ (4). В этом случае длительность АИ по основанию имела размер  $50 \cdot 10^{-6}$  секунд, а его форма была близка к распределению Гаусса. Энергию акустического импульса, вводимого в образец, определяли по скорости налета и отскока шарика от переходной металлической пластины с высокой твердостью, находящейся в акустическом контакте с исследуемым образцом. Скорость шарика определяли в системе СДВ (3), включающей две оптических пары, размещенных в трубке на фиксированном расстоянии друг от друга. В результате скорость шарика определяли по отметкам на мониторе КП1 (9), возникающих при пролете шарика через систему оптических пар. Масса шарика измерялась на весах с точностью  $10^{-6}$  кг. По данным измерения веса, скоростей налета и отскока шарика рассчитывалась разность кинетических энергий  $V_{1,2}$ . Полученная разница, без учета потерь в переходной пластине, является энергией АИ, вводимой в образец. Эту энергию с помощью ПУ можно было регулировать в пределах  $(5-30) \cdot 10^{-3}$  Дж.



**Рис.1.** Стенд для внешнего возбуждения образцов детерминированными АИ импульсами и приема ЭМО при таком воздействии (а); стенд для контроля развития этапов разрушения в диэлектрических образцах, в том числе при ступенчатом нагружении и измерения параметров ЭМС при внешнем акустическом воздействии (б)

**Fig.1.** Stand for external excitation of samples by deterministic AI pulses and receiving EMT under such influence (a); stand for monitoring the development of failure stages in dielectric samples, including those under stepped loading and measuring EMC parameters under external acoustic exposure (b)

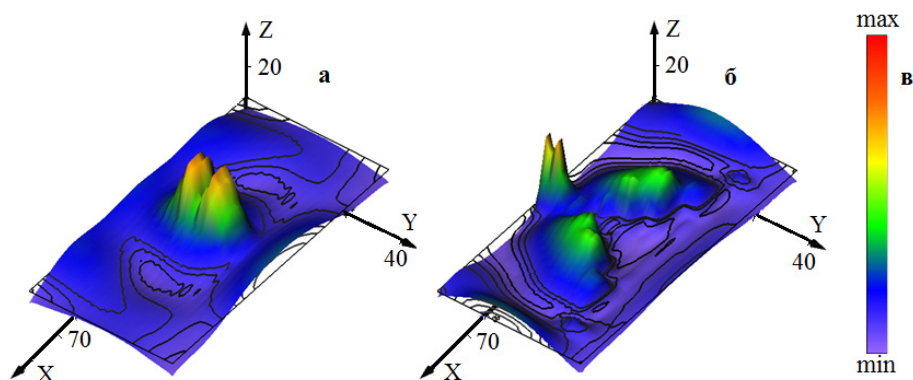
На стендах акустический импульс, прошедший через образец, регистрировали пьезоэлектрическим приемником ПАП (6). Генерируемый электромагнитный сигнал принимали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД (7). В состав датчика входил усилитель мощности. Электромагнитный датчик с усилителем обеспечивал прием ЭМС в частотном диапазоне (1-100) кГц с чувствительностью не менее  $5 \cdot 10^{-6}$  В. Регистрируемые сигналы с ПАП и ЭМД поступали на устройство ввода-вывода NI BNC 2120 (5) с последующей передачей на КПП для дальнейшего нормирования и частотного анализа.

### Результаты исследований

В работах [15, 16] уже указывалось на связь параметров воздействующего на тестируемый диэлектрический объект АИ и генерируемого ЭМС. Для определения влияния образующихся трещин на спектры ЭМС проводился расчет изменения параметров НДС при распространении АИ в упругой неоднородной среде ограниченных размеров. Использовалась классическая модель упругой твердотельной среды [24]. Расчет выполнялся для площадки максимального сечения используемого в экспериментах образца размером  $(42 \cdot 80) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. При вычислениях принимали однородную структуру и текстуру материала. Граничные условия при расчетах параметров распространяющегося по образцу АИ соответствовали постановке лабораторных экспериментов. Амплитуда, длительность и форма АИ при расчетах выбирались такими же, как в лабораторных экспериментах. В расчетах изменения НДС при распространении АИ применяли объемную схему конечно-разностного метода МакКормака [25, 26]. При численном моделировании по этой схеме для каждого момента времени проводится анализ всей расчетной области. Численным алгоритмом схемы расчетов по МакКормаку является метод Рунге-Куты, который применяется для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. При применении к расчетам изменений НДС метода Рунге-Куты второго порядка точности в уравнениях пространственные производные заменяли отношениями конечных разностей и использовали нецентральные разностные операторы. Перечисленные подходы являются основой нецентральной схемы расчетов второго порядка точности, предложенной МакКормаком. При этом в качестве элементов выбирали площадки размером один квадратный миллиметр, а расчетная область разбивалась

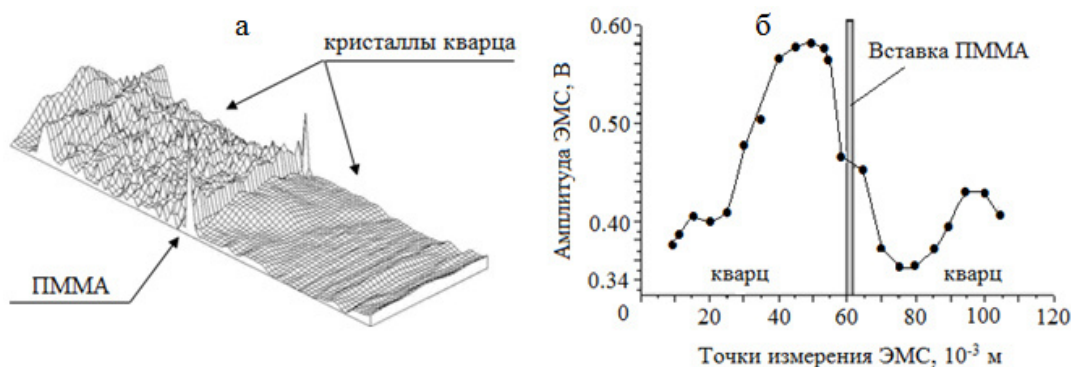
при частоте дискретизации интервалов  $10^{-6}$  секунды на 237500 точек. На рис.2а и рис.2б приведены результаты распространения в образце упругого возмущения через  $30 \cdot 10^{-6}$  секунды. При расчетах трещину длиной  $10^{-2}$  метра располагали вдоль наибольшей оси образца, а по отношению к точке ввода АИ перпендикулярно и посередине этой оси. Распространение акустического импульса выбиралось перпендикулярно трещине. На рис.2а видно, что в области трещины наблюдалась наибольшая интенсивность НДС. Результаты расчетов изменения характеристик НДС в образце с шестью трещинами приведены на рис.2б. Трещины имели размеры  $(2,0 \ 4,0 \ 8,0 \ 16,0 \ 32,0 \ 64,0) \cdot 10^{-3}$  м, которые тоже размещали вдоль наибольшей оси образца. Расстояние между ними составляло  $5 \cdot 10^{-3}$  м. Трещины по отношению к точке приложения АИ располагали в порядке возрастания от меньшей по размеру к большей. На рис.2б вблизи устьев трещин наблюдается наибольшая интенсивность НДС. Это не противоречит теории концентрации напряжений в устье трещин. Кроме того, впереди лежащие трещины по отношению к точке ввода АИ приводят к уменьшению акустического возмущения. Так как устья трещин обладают наибольшим зарядом при своем прорастании, то при акустическом воздействии и колебании этого заряда будет наблюдаться и наибольшая амплитуда электромагнитного сигнала [12, 16].

Как уже отмечалось выше по тексту, при МЭП и АЭП основным фактором возбуждения ЭМС в твердотельных диэлектрических структурах является акустическое воздействие. Поэтому важно определить влияние сложной структуры диэлектриков на параметры распространяющегося АИ и генерируемого при этом ЭМС. В большей степени потери акустической энергии происходит на контактах составляющих диэлектрического материала. Эти контакты можно рассматривать как слоистость структуры. Поэтому в последующих экспериментальных исследованиях определяли влияние слоистости образцов на изменение параметров ЭМС при внешнем воздействии детерминированными АИ. Сначала численно и экспериментально исследовались искусственно созданные слоистые модели из плотно прижатых двух одинаковых по размеру кристаллов кварца и прослойки из ПММА. Акустический контакт осуществляли с помощью минерального масла. На рис.3а приведены результаты расчетов распространения акустического импульса через  $27 \cdot 10^{-6}$  секунды для модели с оргстеклом толщиной  $1,7 \cdot 10^{-3}$  м.



**Рис.2.** Результаты численного моделирования интенсивности напряжений в образце через  $30 \cdot 10^{-6}$  секунды от момента ввода детерминированного акустического импульса: а) для одной трещины величины; б) для шести трещин; в) цветовая гамма, отображающая изменения интенсивности напряжений

**Fig.2.** The results of numerical simulation of the stress intensity in the sample after  $30 \cdot 10^{-6}$  seconds from the moment of input of a deterministic acoustic pulse: a) for one crack of size; b) for six cracks; c) color scale showing changes in stress intensity



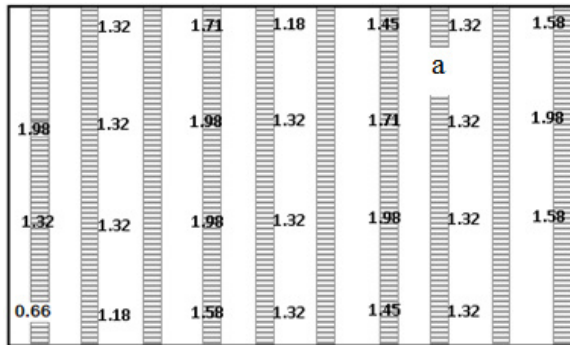
**Рис.3.** Результаты численных расчетов изменения интенсивности механических напряжений: а) через  $27 \cdot 10^{-6}$  секунд в слоистой модели из двух одинаковых кристаллов кварца и вставки между ними из оргстекла с толщиной  $1,7 \cdot 10^{-3}$  метра; б) результаты измерений амплитуды ЭМС в такой же модельной системе

**Fig.3.** The results of numerical calculations of changes in the intensity of mechanical stresses: а) after  $27 \cdot 10^{-6}$  seconds in a layered model of two identical quartz crystals and an insert between them made of plexiglass with a thickness of  $1.7 \cdot 10^{-3}$  meters; б) results of measurements of the EMS amplitude in the same model system

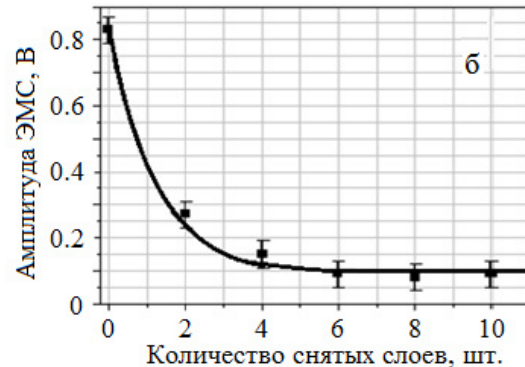
На рис.3б показаны результаты измерений максимальных амплитуд ЭМО диэлектрической слоистой модельной системы на детерминированное импульсное акустическое воздействие. На рисунке наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных значений напряжений и амплитуд ЭМС, регистрируемых в определенных точках этой модели. Наряду с образованием трещин и мозаичным разделением зарядов на их бортах, в диэлектрических материалах также происходит накопление зарядов на контактах разного рода дефектов с вмещающим материалом. Такое заряджение может происходить в результате энергетически разной работой выхода электронов, а также трения бортов трещин и контактов дефектов с диэлек-

триком, движения заряженных дислокаций и их концентрации на контактирующих поверхностях материалов и с помощью других механизмов [24]. Влияние на амплитуду ЭМС при АЭП множественных заряженных слоев, находящихся в непосредственном контакте друг с другом проводили на образцах полосчатого серпентинита. Полосчатую структуру этой горной породы определяли строго чередующиеся минералы серпентина и слоистого хризотил-асбеста (см. таблицу 1). Измерения ЭМС осуществляли электромагнитным приемником ЭМД на наибольшей поверхности образца, имеющей размеры  $(6,0 \cdot 3,5) \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Датчик устанавливали вдоль слоистости хризотил-асбеста, но перпендикулярно чередующимся слоям серпентина.

Распределение зарядов в такой слоистой структуре определяли прибором с вибрирующим электродом [23]. Оказалось, что величина заряда в хризотил-асбесте больше чем в серпентине (рис.4а). Указанные единицы заряда на рис.4а



имеют размерность  $10^{-13}$  Кл. Такое распределение обусловлено разными удельными электрическими сопротивлениями минералов (таблица 1).



**Рис.4.** Распределение зарядов в серпентините в единицах  $10^{-13}$  Кл на контактах минералов серпентина и хризотил-асбеста (заштрихован) (а); изменения максимальных амплитуд ЭМС при внешнем воздействии детерминированным АИ и последовательном удалении слоев серпентина и хризотил-асбеста (б)

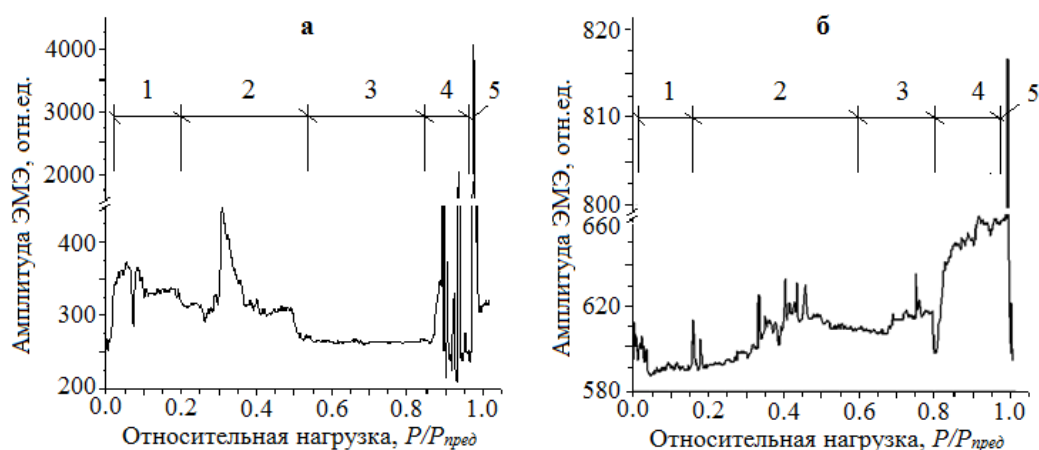
**Fig.4.** Distribution of charges in serpentinite in units of  $10^{-13}$  C at the contacts of serpentine and chrysotile-asbestos minerals (shaded) (a); changes in the maximum amplitudes of EMS under external exposure to deterministic AI and successive removal of layers of serpentine and chrysotile asbestos (b)

Зарегистрированное зарядовое состояние указывает на наличие ДЭС в пределах контактов структурных минералов. Удаляя последовательно слои, можно определить влияние ДЭС на амплитуду ЭМС при возбуждении детерминированными АИ. При удалении слоев электромагнитный приемник смещали на середину оставшейся части образца. На рис.4б видно, что максимальные амплитуды ЭМС уменьшаются при поочередном удалении слоев серпентинита. Удаление контактирующих слоев серпентина и хризотил-асбеста приводит к уменьшению количества ДЭС и, соответственно, к уменьшению генерирующих ЭМС заряженных поверхностей. Следует отметить, что максимальная амплитуда ЭМС из серпентинита в десять раз превышала соответствующую амплитуду из отдельно исследуемых образцов серпентина и хризотил-асбеста. При этом размеры всех образцов были одинаковыми. Уменьшение количества слоев и, соответственно, продольных размеров образца ведет к появлению в спектре ЭМС более высокочастотных составляющих. Полученные в настоящей работе результаты численных и экспериментальных исследований можно использовать для тестирования применимости методов МЭП и АЭП при развитии деструктивных процессов в упругих твердотельных диэлектриках. При этом надо учитывать данные о поляризации образцов со сложной текстурой и разной зернистостью, опубликованные ранее [20]. Для выявления закономерностей изменения характеристик электромаг-

нитной эмиссии в процессе развития деструктивных процессов эксперименты проводили на образцах сиенитового скарна и 75 % магнетитовой руды. Количество образцов каждой горной породы было не менее десяти. Разрушение этих образцов проводили путем одноосного сжатия на стенде, схема которого приведена на рис.1б. Скорость нагружения составляла 3 кН/с. Надо отметить, что образцы, изготовленные даже из одного керна, несколько отличаются по составу и текстуре распределения структурных минералов. При этом изменения характеристик ЭМЭ в процессе развития разрушения одноосным сжатием имеют общие закономерности. На рис.5 на частоте 100 кГц с усреднением ЭМС за одну секунду приведены характерные изменения амплитуд ЭМЭ при разных значениях относительной сжимающей нагрузки  $P/P_{nved}$  на образец магнетитовой руды (рис.5а) и сиенитового скарна (рис.5б). Такой же вид закономерностей развития разрушения наблюдался и при измерении интенсивности ЭМЭ. Здесь  $P$  – текущая нагрузка при одноосном сжатии,  $P_{nved}$  – предельная или разрушающая нагрузка, которая для образца магнетитовой руды имела значение 261 кН, а для образца сиенитового скарна – 295 кН. На рис.5 для обоих типов образцов можно выделить следующие этапы: 1 – начального уплотнения образца; 2 – деструкции и формирования очага разрушения; 3 – устойчивой прочности; 4 – предшествующий разрушению (4) и прорастание трещин отрыва (5). Анализируя рис.5а можно отметить, что при окон-

чании первого этапа в процессе формирования очага разрушения в интервале  $(0,3-0,55)P_{пред}$  происходит существенное возрастание амплитуд ЭМЭ. Причем для образца магнетитовой руды с содержанием 25 % кальцита эта зона имеет два отрезка с возрастанием амплитуды ЭМЭ. Первое увеличение амплитуды ЭМЭ в зоне формирования деструкции обусловлено разрушением более хрупкого кальцита, а второе увеличение ЭМЭ в этой же зоне соответствует развитию разрушения магнетитовой руды. Так как удельное электрическое сопротивление кальцита существенно выше чем у магнетитовой руды (см. таблицу 1), то и амплитуда ЭМЭ пика кальцита на рис.5а будет больше. Это связано с возможностью кальцита при развитии разрушения к более эффективному накоплению заряда. В результате АЭП при распространении по образцу АИ будет наблюдаться и более высокая амплитуда ЭМС. Предшествующий разрушению этап по приведенным характеристикам ЭМЭ прослеживается в интервале  $(0,55-0,86)P_{пред}$ . При повышении нагрузки образец разрушался. При этом усредненные амплитуды ЭМЭ возрастают в несколько раз. Такой

же ход развития деструктивных процессов наблюдали и на образце сиенитового скарна. В нем содержится несколько включений (кальцит, сиенит и скарн), имеющих свой предел разрушения. Поэтому в зоне формирования деструкции в этом образце наблюдается несколько пиков ЭМЭ. Для сравнения с мониторингом методом МЭП были проведены экспериментальные исследования для выявления возможностей контроля развития разрушения МЭП методом при внешнем возбуждении образцов АИ. Сначала с этой целью использовали «ступенчатое» нагружение одноосным сжатием образцов из затвердевшего цементно-песчаного раствора размером  $(10 \cdot 10 \cdot 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , в которых размещали пластины из магнетитовой руды толщиной  $10^{-2}$  и  $4 \cdot 10^{-2}$  метра. Направление ввода АИ было перпендикулярно наибольшей плоскости пластины. На каждой ступени нагрузки производили по десять воздействий АИ. На рис.6 показаны закономерности изменения усредненных амплитуд ЭМС на такое акустическое воздействие. На рис.6а толщина вставок магнетитовой руды составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  м, а на рис.6б –  $4 \cdot 10^{-3}$  м.



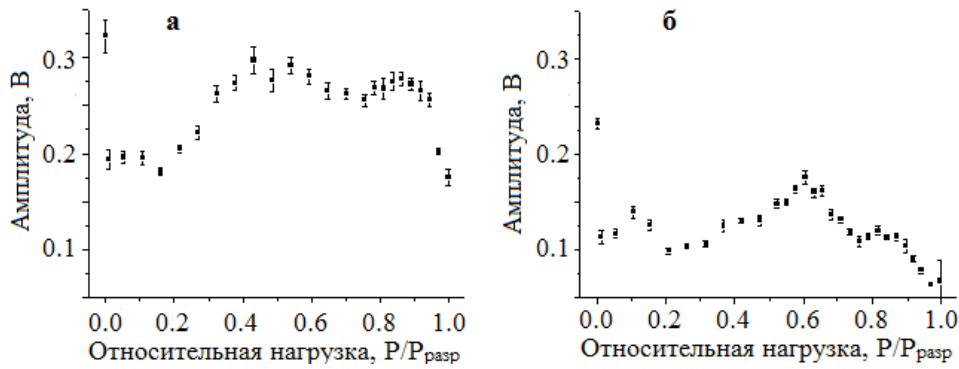
**Рис.5.** Изменения усредненных за одну секунду амплитуд ЭМЭ на частоте 100 кГц при разных значениях относительной сжимающей нагрузки на образцы: а) магнетитовой руды; б) скарна: 1 – этап уплотнения; 2 – этап формирования очага разрушения; 3 – этап устойчивой прочности; 4 – этап предшествующий разрушению; 5 – прорастание трещины отрыва

**Fig.5.** Changes in the EME amplitudes averaged over one second at a frequency of 100 kHz at different values of the relative compressive load on the samples: а) magnetite ore; б) skarna: 1 – compaction stage; 2 – the stage of formation of the fracture center; 3 – stage of stable strength; 4 – stage preceding destruction; 5 – rupture propagation

На рис.6а и 6б также как и в образцах магнетитовой руды видны этапы развития разрушения: уплотнение; развитие зоны разрушения в интервале  $0,2-0,7$  от  $P_{пред}$ , плавное разрушение. На таких образцах плавность разрушения обусловлена свойствами ЦПС [27]. На рис.6 также показано, что на «ступеньках» нагружения одноосным сжатием и акустического возбуждения образцов ЦПС наблюдались отличия

усредненных амплитуд ЭМС. Использование в дополнительных экспериментах вставок толщиной  $0,5 \cdot 10^{-2}$  м и  $3 \cdot 10^{-2}$  м подтвердило предположение о том, что отличие амплитуд обусловлено увеличением затухания АИ во вставках магнетитовой руды. Такие изменения параметров ЭМС были смоделированы ранее и приведены на рис.3.



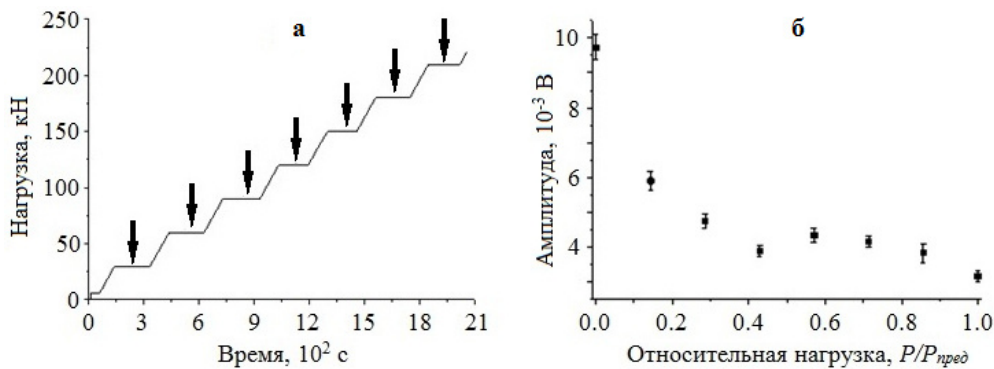


**Рис.6.** Закономерности изменения усредненных амплитуд ЭМО модельных образцов из ЦПС размером  $(10 \cdot 10 \cdot 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  с дефектами из магнетитовой руды разной толщины на внешнее АИ при «ступенчатом» одноосном нагружении сжатием до разрушения: а) толщина вставки  $10^{-2} \text{ м}$ ; б) толщина вставки  $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

**Fig.6.** Patterns of change in the average amplitudes of the EMT of model samples from the CPS with a size of  $(10 \cdot 10 \cdot 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  with defects from magnetite ore of different thicknesses to external AI under «stepped» uniaxial loading by compression to failure: а) insert thickness of  $10^{-2} \text{ м}$ ; б) insert thickness  $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

Аналогичные исследования АЭП проводили при «ступенчатом» нагружении образцов 75 % магнетитовой руды с содержанием 25 % кальцита, таких же, как и при постоянно нарастающей нагрузке одноосным сжатием (см. рис.5). На рис.7а показан график одноосного «ступенчатого» нагружения сжатием до разрушения образца. На рис.7б приведена типичная зависимость усредненных максимальных амплитуд ЭМО, полученная при «ступенчатом» одноосным сжатием и возбуждении образцов

до 10 раз на «ступеньках» внешними детерминированными АИ. На рис.7б в интервале от начала приложения нагрузки до  $0,4 P_{пред}$  явно выражен этап уплотнения образца, а в интервале  $(0,4-0,85) P_{пред}$  наблюдается процесс развития деструкции образца. Кроме того, для образцов ЦПС с дефектом и для образца магнетитовой руды общим является включение этапа устойчивой прочности в полученные закономерности при образовании и развитии деструктивных процессов.



**Рис.7.** График изменения во времени «ступенчатого» нагружения сжатием до разрушения образца, где стрелками указано внешнее возбуждение АИ (а), и закономерность изменения усредненных амплитуд ЭМС образцов 75 % магнетитовой руды при ступенчатом одноосном нагружении и внешнем акустическом возбуждении (б)

**Fig.7.** Graph of the change in time of «stepped» loading by compression until the destruction of the sample, where the arrows indicate the external excitation of AI (а), and the regularity of the change in the average amplitudes of the EMS of samples of 75 % magnetite ore under stepwise uniaxial loading and external acoustic excitation (б)

### Обсуждение и выводы

Таким образом, в настоящей работе приведены результаты численных и экспериментальных исследований ЭМЭ и ЭМС при механико-электрических и акустико-электрических пре-

образованиях, соответственно. Показано, что присутствие трещин в тестируемом объекте существенно изменяет распределение механических напряжений при распространении акустических импульсов и, как следствие, приводит к изменению параметров электромагнитных

сигналов или их последовательностей. В процессе подготовки и развития разрушения при МЭП акустические импульсы возникают внутри твердотельных диэлектрических материалов. На начальном этапе при одноосном сжатии генерация АИ происходит за счет высвобождения энергии при раскрытии вновь образующихся микротрещин и их прорастания, а также трения, возникающего при уплотнении имеющихся полостей, трещин и контактов структурных элементов материалов. В результате в процессе одноосного сжатия снижается суммарное количество уже имеющихся до нагружения дефектов структуры и, соответственно, уменьшается количество двойных электрических слоев. Снижение количества ДЭС на первом этапе нагружения приводит к уменьшению генерируемых ЭМС дефектов структуры и сопровождается спадающей амплитудой и интенсивностью ЭМЭ. Кроме того, уменьшение амплитуды ЭМЭ на этом этапе связано также с тем, что акустические импульсы, генерируемые при образовании микротрещин, имеют малую длительность и амплитуду и малоэффективны при генерации ЭМС в диапазоне частот (1-100) кГц. Такое снижение амплитуды ЭМЭ, наряду с акустическими и электрическими свойствами диэлектрика, обусловлено связью параметров ЭМС и возбуждаемых АИ.

На параметры ЭМЭ оказывает существенное влияние и слоистость контролируемых структур. Это экспериментально показано на примере модельного образца, составленного из двух кристаллов кварца и прослойки из ПММА. Численные расчеты показали существенное различие распределения параметров НДС до и после прохождения АИ через прослойку. В этой геометрии при перемещении электромагнитного приемника вдоль модельной слоистой системы экспериментально получены закономерности изменения ЭМС, которые хорошо совпадают с распределением в модельном образце НДС. В большей степени это связано с разным акустическим импедансом образца и включения.

Экспериментально выявлено влияние на параметры ЭМС количества двойных электрических слоев. Уменьшение количества слоев оказывало существенное влияние на амплитуду ЭМС.

Таким образом, используя полученные закономерности о влиянии трещин и слоистости твердотельных диэлектрических материалов на параметры ЭМС, можно определить связь характеристик ЭМЭ, возникающей в процессе

развития деструкции образцов, и этапами подготовки их разрушения при одноосном сжатии.

Анализируя МЭП при одноосном сжатии, были выявлены некоторые закономерности изменения амплитудно-частотных параметров генерируемых электромагнитных сигналов. Наблюдалось возрастание амплитуды ЭМЭ, соответствующего каждому этапу подготовки и развития разрушения, которые включают возникновение и развитие зоны деструкции, участок предшествующий разрушению и образования трещин отрыва. Спектр ЭМС на каждом этапе развития разрушения имел характерные частоты, которые в основном связаны с размерами образующихся трещин и других дефектов. При этом по мере развития деструктивных процессов в образце происходит смещение спектральных составляющих электромагнитных сигналов в область более низких частот.

Внешнее импульсное детерминированное акустическое возбуждение тестируемых образцов показало, что по параметрам ЭМС и в этом случае удовлетворительно отслеживаются образование и развитие деструкции, в том числе в дефектных диэлектрических образцах. При этом также как и при ЭМЭ изменение параметров ЭМС в большей степени связано с трещинообразованием и ростом трещин в процессе нагружения [16, 18]. По закономерностям изменения амплитуды ЭМС можно отчетливо выделять зоны начала образования деструктивных процессов и их развитие. Причем процессы развития разрушения имеют свои закономерности. Исследования модельных образцов из ЦПС со вставкой из магнетитовой руды показали, что с ростом толщины вставки амплитуда ЭМС уменьшается. Это связано с увеличением затухания АИ в материале вставки. Кроме того, появление в середине полученных закономерностей нарастание и спад амплитуды ЭМС связано с имеющейся дефектностью образца ЦПС. Очевидно, что при распространении акустических импульсов необходимо учитывать влияние акустического импеданса основного материала и дефекта (см. таблицу 1).

В отсутствии знаний о свойствах дефекта, используя метод внешнего акустического зондирования, возможно получение сведений об его акустических свойствах и импедансе. Определение спектров ЭМС, возбуждаемых внешними АИ, позволит определять процесс роста трещин. По итогам тестирования методом АЭП выявлено, что этот метод также применим для определения зоны развития деструктивных процессов. При этом мониторинг с использованием метода АЭП отличается от мето-

да МЭП тем, что тестирование развития разрушения осуществляется не непрерывно, а в выбранные моменты времени.

Таким образом, методы МЭП и АЭП при одноосном нагружении сжатием или при других видах нагрузок, используемых на практике, будет полезным для текущего контроля образования деструкции неметаллических материалов и развития его разрушения. Кроме того, метод АЭП может быть использован для обнаружения любых дефектов в твердотельных диэлектриках, имеющих отличающийся акустический импеданс или удельное электрическое сопротивление.

### Список литературы

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах. М.: Машиностроение, 2008. 323 с.
2. Неразрушающий контроль (ред. В.В. Сухоруков), кн.4: М.: Высшая школа, 1992. 321 с.
3. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия, М.: Атомиздат, 1974. 510 с.
4. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, Springer, 1997. 261 p.
5. Ganchev S.I., Qaddoumi N., Ranu E., Zoughi R. Microwave detection optimization of disband in layered dielectrics with varying thickness // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1995. V. 44, N 2. P. 326–328.
6. Francesco Ficilli Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 140 p.
7. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Изд.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
8. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. 1981. Т. 256, № 4. С. 824–826.
9. Fursa T.V., Dann D.D., Demikhova A.A. Influence of the surface crack concentration and crack orientation in concrete subjected to a pulsed mechanical action on the electrical response parameters // Technical Physics. 2014. V. 59, N 12. P. 1815–1818.
10. Rabinovitch A., Frid V., Goldbaum J., Bahat D. Polarization-depolarization process in glass during percussion drilling // Philosophical Magazine. 2003. V. 83, N 25. P. 2929–2939.
11. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello 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.
12. 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, N 11. P. 127–135.
13. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // J. Geophys. Res., 1985. V. 90. P. 6245–6249.
14. Bespal’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. 30(9).
15. Хатиашвили Н.Г. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // ДАН СССР. 1982. Т. 263, № 4. С. 839–842.
16. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // Phys. Earth Planet. Int. 1989. V. 57, N 1-2. P. 157–168.
17. Fursa T.V., Utsyn G.E., Dann D.D., Petrov M.V. Development prospects for nondestructive testing of heterogeneous nonmetallic materials by the parameters of electrical response to a shock action // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53, N 2. P. 104–110.
18. Bespal’ko A.A., Surzhikov A.P., Dann D.D., Utsyn G.E., Petrov M.V., Pomishin E.K. Modelling Acoustic-Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. N 2. P. 85–95.
19. Bespal’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. V. 52, N 2. P. 279–285.
20. Bespal’ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O. Polarization and Electromagnetic Emissions of Natural Crystalline Structures upon Acoustic Excitation // Materials Science Forum. 2019. V. 970. P. 153–166.
21. Добрынин В.М., Вендельштайн В.О., Кожевников В.А. Петрофизика (физика горных пород). М.: Издательский дом «Нефть и газ», Москва, 2004. 368 с.
22. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: «Недра», 1984. 455 с.
23. Алейников А.Н., Алейников Н.М. Индукционные методы определения параметров остаточного заряжения диэлектрических мате-

риалов // *Материаловедение*. 2002. № 3. С. 26–33.

24. Давыдов А.С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.

25. 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.

26. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists/ Second edition revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. 840 p.

27. Бадьин Г.М. Справочник технолога-строителя. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 528 с.

### Информация об авторах

*А. А. Беспалько – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.*

*Д. Д. Данн – кандидат технических наук, научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.*

*Ц. Ло – аспирант Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.*

*П. И. Федотов – кандидат технических наук, инженер-исследователь Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.*

### References

1. Klyuyev, V. V. (2008). Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik v 8 tomakh. M.: Mashinostroyeniye. P. 323. (In Russ.).

2. (1992). Nerazrushayushchiy kontrol' (red. V. V. Sukhorukov), kn.4: M.: Vysshaya shkola. P. 321. (In Russ.).

3. Rumyantsev, S. V. (1974). Radiatsionnaya defektoskopiya, M.: Atomizdat. P. 510. (In Russ.).

4. Blitz, J. (1997). Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, Springer. P. 261.

5. Ganchev, S. I., Qaddoumi, N., Ranu, E. & Zoughi, R. (1995). Microwave detection optimization of disband in layered dielectrics with varying thickness. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 44(2), 326–328.

6. Francesco, Ficilli (2012). Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques. LAP Lambert Academic Publishing. P. 140.

7. Vavilov, V. P. (2009). Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'. Izd.: ID Spektr. P. 544. (In Russ.).

8. Perel'man, M. E. & Khatiashvili, N. G. (1981). O radioizlucheni pri khрупkom razrushenii dielektrikov. *DAN SSSR*, 256(4), 824–826. (In Russ.).

9. Fursa, T. V., Dann, D. D. & Demikhova, A. A. (2014). Influence of the surface crack concentration and crack orientation in concrete subjected to a pulsed mechanical action on the electrical response parameters. *Technical Physics*, 59(12), 1815–1818.

10. Rabinovitch, A., Frid, V., Goldbaum, J. & Bahat, D. (2003). Polarization-depolarization process in glass during percussion drilling. *Philosophical Magazine*, 83(25), 2929–2939.

11. Lacidogna, G., Carpinteri, A., Manuello, A., Durin, G., Schiavi, A., Niccolini, G. & Agosto, A. (2010). Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes. *Strain*, 47, 144–152.

12. O'Keefe, S. G. & Thiel, D. V. (1995). A mechanism for the production of electromagnetic radiation during the fracture of brittle materials. *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 89(11), 127–135.

13. Ogawa, T., Oike, K. & Miura, T. (1985). Electromagnetic radiations from rocks. *J. Geophys. Res.*, 90, 6245–6249.

14. Bespal'ko, A. A., Shtirts, V. A., Fedotov, P. I., Chulkov, A. O. & Yavorovich, L. V. (2019). Modelling of Infrared Glow in Rock Holes. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38, 30(9).

15. Khatiashvili, N. G. (1982). Generatsiya elektromagnitnogo izlucheniya pri prokhozhenii akusticheskikh voln cherez kristallicheskiye dielektriki i nekotoryye gornyye porody. *DAN CCCP*, 263(4), 839–842. (In Russ.).

16. Yamada, I., Masuda, K. & Mizutani, H. (1989). Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys. Earth Planet. Int.*, 57(1-2), 157–168.
17. Fursa, T. V., Utsyn, G. E., Dann, D. D. & Petrov, M. V. (2017). Development prospects for nondestructive testing of heterogeneous nonmetallic materials by the parameters of electrical response to a shock action. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 53(2), 104–110.
18. Беспалько, А. А., Surzhikov, А. Р., Данн, Д. Д., Утсин, Г. Е., Петров, М. В. & Помышин, Е. К. (2021). Modelling Acoustic-Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, (2), 85–95.
19. Беспалько, А. А., Исаев, Я. Н. & Яворович, Л. В. (2016). Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures. *Journal of Mining Science*, 52(2), 279–285.
20. Беспалько, А., Surzhikov, А., Fedotov, Р., Помышин, Е. & Старый, О. (2019). Polarization and Electromagnetic Emissions of Natural Crystalline Structures upon Acoustic Excitation. *Materials Science Forum*, 970, 153–166.
21. Dobrynin, V. M., Vendel'shtayn, V. O. & Kozhevnikov, V. A. (2004). *Petrofizika (fizika gornyx porod)*. М.: Izdatel'skiy dom «Nef't' i gaz», Moskva. P. 368. (In Russ.).
22. Dortman, N. B. (1984). *Fizicheskiye svoystva gornyx porod i poleznykh iskopayemykh*. М.: «Nedra». P. 455. (In Russ.).
23. Aleynikov, A. N. & Aleynikov, N. M. (2002). Induktsionnyye metody opredeleniya parametrov ostatochnogo zaryazheniya dielektricheskikh materialov. *Materialovedeniye*, (3), 26–33. (In Russ.).
24. Davydov, A S. (1976). *Teoriya tverdogo tela*. М.: Nauka. P. 640. (In Russ.).
25. Uorming, R. F., Kutler, P. & Lomaks, G. (1973). Netsentral'nyye raznostnyye skhemy II i III poryadka tochnosti dlya resheniya nelineynykh uravneniy giperbolicheskogo tipa. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*, 11(2), 76–85. (In Russ.).
26. Hoffman, J. D. (2001). *Numerical methods for engineers and scientists/ Second edition revised and expanded*. New York: Marcel Dekker., Inc. P. 840.
27. Bad'in, G. M. (2010). *Spravochnik tekhnologa-stroitel'ya*. SPb.: BKHV-Peterburg. P. 528. (In Russ.).

### Information about the authors

*A. A. Bespal'ko – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors of the Research School of Physics of High-Energy Processes, National Research Tomsk Polytechnic University.*

*D. D. Dunn – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors, Research School of Physics of High-Energy Processes, National Research Tomsk Polytechnic University.*

*J. Lo – Post-Graduate Student of the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors of the Research School of Physics of High-Energy Processes, National Research Tomsk Polytechnic University.*

*P. I. Fedotov – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors, Research School of Physics of High-Energy Processes, National Research Tomsk Polytechnic University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 17.07.2023.

The article was received by the editorial board on 21 June 23; approved after reviewing 03 July 23; accepted for publication 17 July 23.