

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. А.А. Беспалько<sup>1,\*</sup>, Д.Д. Данин<sup>1,\*\*</sup>, М. В. Петров<sup>1</sup>, Е.К. Помишин<sup>1</sup>,  
Г.Е. Уцын<sup>2</sup>, П. И. Федотов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 40

E-mail: \*besko48@tpu.ru; \*\*dddann@tpu.ru; \*\*\*mvp17@tpu.ru

Поступила в редакцию 06.09.2021; после доработки 16.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Обсуждаются комплексные методы механико-электрического и акустико-электрического тестирования трещинообразования при изменении напряженно-деформированного состояния на примере диэлектрических образцов горных пород. В статье рассматриваются результаты численных и экспериментальных исследований изменения параметров электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении образцов горных пород с различным составом и текстурой. Представлены результаты математических расчетов концентрации напряжений на трещинах расположенных вдоль оси образца, перпендикулярно которой вводились детерминированные акустические импульсы. Показаны результаты экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии образца с содержанием кальцита и магнетита при одноосном сжатии до разрушения. Приведены закономерности изменений амплитуд электромагнитных сигналов при акустическом зондировании в процессе «ступенчатого» одноосного нагружения сжатием до разрушения.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, диэлектрики, горные породы, акустическое воздействие, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.31857/S0130308221100055

### ВВЕДЕНИЕ

В статье представлены новые методы тестирования дефектности и развития разрушения диэлектрических гетерогенных материалов, которые основаны на механико-электрических (МЭП) и акустико-электрических (АЭП) преобразованиях в них, результатом которых являются, соответственно, электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) и электромагнитные сигналы (ЭМС). Механико-электрические преобразования происходят в твердотельных структурах при изменении их напряженно-деформированного состояния под воздействием механической нагрузки, сопровождающейся акустической эмиссией внутри испытываемого материала. Возникающие акустические импульсы вызывают колебания заряженных бортов окружающих и растущих трещин, контактов материалов и дефектов. В результате генерируются ЭМС с разными амплитудно-частотными параметрами, последовательность которых определяется как ЭМЭ. Эмиссия в этом случае характеризуется изменяющейся амплитудой и частотой следования ЭМС. Связь акустической и электромагнитной эмиссий проверялась на модельных образцах и при изменении напряженно-деформированного состояния породного массива после массовых взрывов на Таштагольском железорудном месторождении [1—3]. При этом акустическую эмиссию регистрировали пьезоэлектрическим приемником, а ЭМЭ — емкостным датчиком.

Внешнее акустическое воздействие на твердотельные диэлектрические материалы и структуры также вызывает появление электромагнитных сигналов при наличии дефектов или трещинообразования. Связь внешнего акустического воздействия и генерации ЭМС называют акустико-электрическим преобразованием. В этом случае параметры электромагнитных сигналов наряду с электрическими и прочностными свойствами тестируемого материала определяются и характеристиками возбуждающего акустического сигнала. Исследования электромагнитного излучения осуществлялось для разных диэлектрических материалов, в том числе при их разрушении под воздействием внешних нагрузок и детерминированного акустического воздействия [4—15]. Эти исследования проводились для тестирования дефектности и развития процессов разрушения твердотельных диэлектрических материалов, в том числе горных пород. Наличие, появление, количественное или качественное изменение электрических зарядов является обязательной причиной возникновения ЭМС.

Электризация контактов разнородных материалов и сред может происходить в результате: разности работы выхода электронов с поверхностями контактирующих материалов; движения дислокаций и сбором при их движении заряженных точечных дефектов с локализацией у поверхностей раздела сред; трения слоев и др. [16—23]. При прорастании трещин тоже происходит зарядение бортов трещин в результате разделения частиц с разным итоговым зарядом [11, 12]. В работе [20] детально рассмотрены вопросы зарядения слоев горных пород с разной текстурой и составом, а в работе [24] — заряженные трещины в виде системы диполей, у которых беспорядочная ориентация дипольных моментов. На некотором этапе механического воздействия эти диполи приобретают преимущественную ориентацию. При этом рассчитывалась величины напряженности электрического поля, являющейся функцией, как элементарных источников, так и среднего значения их электрического момента.

В работах [6, 7] выявлено, что при воздействии акустической волны формируется ЭМС, которые являются следствием колебательных движений двойных электрических слоев и флуктуационно-заряженных берегов микротрещин, освобождением и колебанием заряженных дислокаций. При этом параметры ЭМС определяются амплитудно-частотным спектром акустического поля. Авторы этих работ провели математическое и физическое обоснование тестирования дефектности диэлектрических гетерогенных материалов по параметрам электромагнитного сигнала. Указывается, что в случае, когда нормированным однократным ударом возбуждаются механические колебания, то это должно способствовать появлению тока смещения. При этом амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов, диэлектрических свойств твердотельных материалов и зарядового состояния имеющихся дефектов, в том числе в виде включений, полостей и трещин.

Таким образом, формирование ЭМС обусловлено изменением зарядового состояния тестируемого материала при развитии трещин различного масштаба или двойных электрических слоев на контактах сред и минералов, а также на контактах с водными растворами. Для диэлектрических материалов, используемых при воздействии механических нагрузок любого типа, могут применяться механико-электрические методы с использованием акустических импульсов, испускаемых разрастающимися трещинами разной длины, и электромагнитных сигналов, возникающих при колебании заряженных берегов трещин, окружающих источник акустических импульсов. В качестве альтернативного метода тестирования развития трещинообразования является внешнее акустическое воздействие детерминированными акустическими видео или радиоимпульсами с регистрацией возбуждаемых ими ЭМС и последующим их амплитудно-частотным анализом [8, 10, 14, 25]. Исследование закономерных изменений характеристик ЭМЭ и параметров ЭМС при нарастании нагрузок и внешнем акустическом воздействии на диэлектрические материалы и структуры позволит развить механико-электрические и акустико-электрические методы до практического применения при постоянном тестировании процессов развития трещинообразования и разрушения.

## МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования механико-электрических и акустико-электрических преобразований проводили на образцах горных пород Таштагольского железорудного месторождения, в которых возможно было подобрать разное соотношение магнетита и кальцита. Эти минералы отличаются предельной прочностью: кальцит в зависимости от формы включения в горной породе —  $(12—50) \times 10^6$  Па [26]; магнетитовая руда по экспериментальным данным измерений разрушения кернов диаметром 0,042 м —  $(14—21,5) \times 10^7$  Па. Известно, что предел прочности хрупких материалов прямолинейно соотносится с твердостью по шкале Мооса [26, 27], поэтому можно производить сравнение полученных экспериментальных закономерностей ЭМЭ и по твердости минералов составляющих магнетитовую руду, которая для кальцита имеет значение 3, а для магнетита — 6. Кроме того, кальцит и магнетит существенно различаются и по электрическим характеристикам. Так, удельное электрическое сопротивление кальцита  $\rho_k$  составляет  $(10^7—10^{12})$  Ом·м, а магнетита — в пределах  $(10^{-5}—10^4)$  Ом·м [26, 28]. Процентное содержание магнетита уточняли после разрушения образцов с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра X'TRA [29]. Содержание магнетита в используемых образцах колебалось от 60 до 77 процентов. Помимо этого использовали образцы скарна, также содержащие магнетит. Размеры образцов имели диаметр  $(42 \pm 1) \times 10^{-3}$  м и длину  $(80 \pm 5) \times 10^{-3}$  м.

Исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосных нагрузках сжатием осуществляли на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 1.

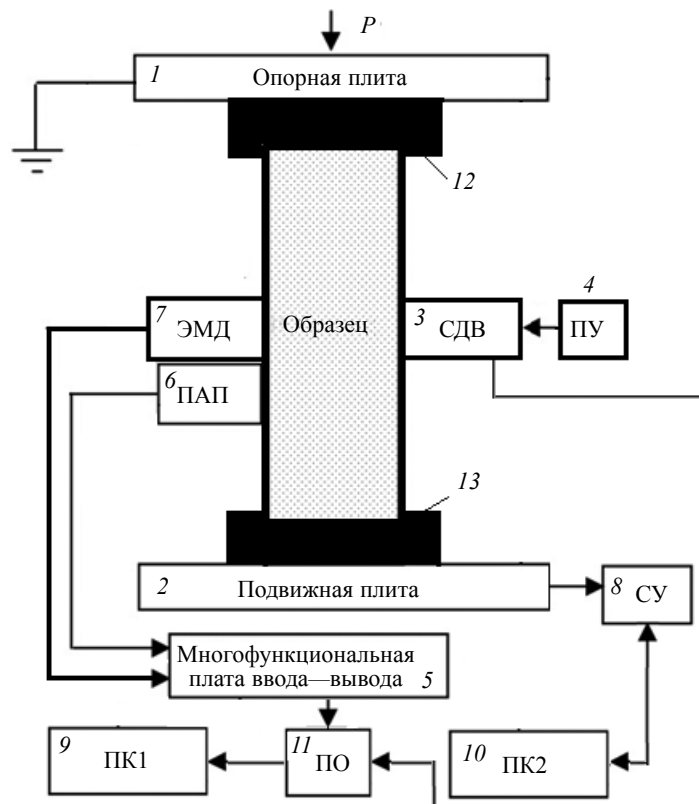


Рис. 1. Блок-схема стенда для одноосного сжатия исследуемых образцов:

1 — опорная плита прессы ИП500.1; 2 — подвижная плита прессы ИП500.1; 3 — система динамического возбуждения для контроля энергии удара шариком; 4 — пружинное устройство ПУ разгона шарика для ввода в образец детерминированного акустического импульса; 5 — многофункциональная плата ввода—вывода NI BNC 2120; 6 — пьезоэлектрический приемник акустических импульсов ПАП; 7 — электромагнитный дифференциальный ЭМД емкостной датчик; 8 — система управления СУ прессом с сервоклапаном; 9 — персональный компьютер ПК1 для визуализации и амплитудно-частотного анализа акустических и электромагнитных сигналов; 10 — персональный компьютер ПК2 для ввода задания сервоприводу прессы и вывода информации о прилагаемых напряжениях и деформации образца; 11 — блок программного обеспечения; 12 и 13 — держатели для центрирования образца.

В процессе эксперимента образец располагали между опорной (1) и подвижной плитами (2) автоматизированного прессы ИП500.1, который развивал усилие  $P$  на образце до 500 кН. Нагрузка и скорость нагружения образца задавались с помощью специализированной программы с компьютера ПК2 (10) через систему управления СУ (8) на исполнительный механизм сервоклапана. Причем изменения нагрузки могло быть задано линейным, ступенчатым или циклическим. Для центрирования образцов использовали специальные держатели 12 и 13. Запись информации об изменениях деформации образца от прилагаемых усилий и их вид записывались и отображались также на мониторе компьютера ПК2. Одноосное сжатие проводили при постоянной скорости 0,3 Па/с. Акустическое импульсное возбуждение образцов ударом шарика проводилось с помощью пружинного устройства разгона ударяющего шарика ПУ (4) через систему контроля энергии удара СДВ (3) [12, 23]. Форма акустического импульса была близка к колоколообразному распределению Гаусса, а длительность его на уровне 0.1 от основания составляла  $50 \times 10^{-6}$  с. Точечный удар шариком массой  $8.6 \times 10^{-4}$  кг наносился посередине свободной цилиндрической части образца. После пролета через 3 шарик ударялся в стальную закаленную пластину толщиной  $2 \times 10^{-3}$  м, возбуждал детерминированный акустический импульс, который через слой минерального масла между пластиной и образцом проходил в образец. Твердость стали пластины и шарика имели равные значения. Остаточная энергия удара, вводимая в образец, после отскока шарика составляла  $(5-30) \times 10^{-3}$  Дж. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался пьезоэлектрическим приемником акустических импульсов ПАП (6).

Система СДВ состояла из металлической трубки с двумя оптическими парами, встроенными в нее на расстоянии  $5 \times 10^{-2}$  м, каждая из которых включала свето- и фотодиод. Шарик, пролетая через оптические пары, давал две отметки на мониторе компьютера ПК1 (9). По этим отметкам

рассчитывались скорости налета  $V_1$  и отскока  $V_2$  шарика. По вычисленным скоростям определяли кинетическую энергию акустического воздействия, передаваемую образцу.

Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала, принимали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД (7) со встроенным усилителем мощности. В датчике использовались фильтры нижних и верхних частот, которые обеспечивали его работу в диапазоне от 1 до 100 кГц. На выходе ЭМД сигнал усиливался с коэффициентом 10 или 100. При измерениях коэффициент усиления выбирался в зависимости от амплитуды входного ЭМС. Чувствительность ЭМД по входу  $5 \times 10^{-4}$  В. Сигналы с ЭМД и ПАП через multifunctionальную плату NI VNC 2120 (5) передавался на КПП (9). В дальнейшем с помощью специальной программы ПО (11) амплитуда ЭМС нормировалась по амплитуде акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика, и по программе быстрого преобразования Фурье производился амплитудно-частотный анализ ЭМС.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе рассматриваются результаты численного и экспериментального исследования изменения параметров электромагнитных сигналов, генерируемых при детерминированном акустическом возбуждении образцов горных пород при развитии трещинообразования и разрушения. Экспериментально исследовали закономерности изменений характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии до разрушающих значений образца. Эти исследования проводились для определения применимости механико-электрических методов при тестировании развития деструктивных зон и разрушения в диэлектрических материалах. Исследовались также закономерности изменения параметров ЭМС при детерминированном акустическом зондировании в процессе нарастания сжимающих нагрузок до разрушения образца. Здесь использовалось «ступенчатое» нагружение, при котором в течение необходимого для проведения экспериментальных действий поддерживался выбранный уровень одноосного сжатия. В этом случае определялась перспективность тестирования развития деструкции образцов акустико-электрическим методом.

Так как амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов, то в настоящей работе было проведено численное моделирование распространения акустического импульса в упругой неоднородной среде ограниченных размеров с заданными физико-механическими свойствами при воздействии этим импульсом на часть ее поверхности. Проводился расчет параметров напряженно-деформированного состояния (перемещения, деформации, напряжения). Использовалась простейшая классическая модель твердого тела. Задача волновой механики решалась с использованием таких гипотез, традиционных для классической модели упругой среды, как, например, однородности и сплошности [30—31]. При наличии каких-либо неоднородностей вследствие дефектов или включений эти неоднородности учитывались явным образом, то есть входили в постановку задач. В общем случае система уравнений, описывающая поведение деформируемого твердого тела в пространстве декартовой системы координат, включает в себя: уравнения движения, уравнения неразрывности, соотношения для компонент тензора скоростей полных деформаций и определяющие соотношения. В частном случае эта система уравнений задает связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций.

Для используемых в экспериментах образцов такая модель может применяться с некоторыми допущениями. Например, при решении задач о распространении волн принимается, что пористостью, а также другими неоднородностями можно пренебречь. Граничные условия соответствовали лабораторному эксперименту, а именно на нижней и верхней границах образца задавались нулевые смещения, так как в лабораторном эксперименте образец устанавливали между сжимающими пуансонами пресса. Боковые грани свободны, поэтому напряжения на границе равны нулю. Посередине свободной боковой поверхности образца от сжимающих пуансонов пресса задавалась акустическая нагрузка в виде плавно нарастающей и затем плавно убывающей функции имеющая зависимость от времени и пространственных координат. Импульс возбуждения соответствовал используемому воздействию в экспериментах по форме, амплитуде и длительности. По окончании импульсной нагрузки на поверхности напряжения задаются нулевыми значениями.

Для определения изменений во времени напряженного состояния образцов при одноосном сжатии и развития разрушения использовали объемную расчетную схему метода МакКормака [32—36], являющуюся конечно-разностным методом типа предиктор-корректор. Эта схема относится к схемам сквозного счета, в соответствии с ней специальным образом не выделяется положение волнового фронта, а проводится анализ всей расчетной области для каждого момента времени, что является необходимостью для последующего использования результатов моделиро-

вания. Схема МакКормака предполагает использование прямоугольной схемы расчетной сетки, которая имеет ряд преимуществ: упрощение математических расчетов, затрачивается меньше машинного времени для расчетов, упрощается постановка граничных условий, упрощается обработка результатов без потери информации. Наилучшие результаты дают сетки с квадратными ячейками, так как минимизируется эффект «песочных часов», то есть перекручивание ячеек сетки. Численный алгоритм этого метода аналогичен методу Рунге—Кутта для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Для того чтобы по известному смещению в материале  $U(t)$  можно было получить решения на следующем шаге по времени  $U(t + \Delta t)$ , необходима одна или несколько итераций. Прежде чем использовать метод типа метода Рунге—Кутта второго порядка точности, пространственные производные в уравнениях заменялись соответствующими отношениями конечных разностей. Предлагается использовать нецентральные разностные операторы, например, попеременно левые или правые разности вместо центральных разностей. Такой подход и положен в основу эффективной нецентральной схемы второго порядка, предложенной МакКормаком. Преимущества нецентральных схем по сравнению с большинством обычных центральных схем состоит в том, что упрощается логика программы, легко включаются неоднородные члены и непосредственно осуществляется обобщение на многомерные задачи. 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.

Таким образом, граничные условия могут быть заданы через перемещения. Различают несколько типов граничных условий: свободные границы, скольжение вдоль жесткой стенки или жесткое закрепление. Неоднородности заданы в виде областей с отличающимися от основного материала упругими характеристиками (модулем упругости, коэффициентом Пуассона и плотностью).

Размер элементов в конечно-элементной модели при расчетах составлял  $10^{-3} \times 10^{-3}$  м. Расчет содержал 237 500 точек при частоте дискретизации интервалом в  $10^{-6}$  с. Расчеты выполнены для образца с упругими свойствами, которые соответствовали лабораторному образцу диаметром  $42 \times 10^{-3}$  м и длиной  $80 \times 10^{-3}$  м. С использованием построенной математической модели был выполнен анализ процессов распространения упругих волн в образце при импульсном механическом воздействии. Это позволяет получать детальные распределения параметров, описывающих поведение материала, в отличие от экспериментальных исследований, когда измеряемые величины имеют преимущественно интегральный смысл. Результаты численного моделирования визуализированы с помощью специального графического пакета.

На рис. 2 приведены результаты распространения упругого возмущения в области заданного размера содержащую трещину длиной  $10^{-2}$  м вдоль оси образца и посередине его. Распространение акустического импульса перпендикулярно трещине. Здесь наглядно показаны результаты численного моделирования изменений во времени интенсивности напряжений на такой трещине.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования изменения интенсивности напряжений в области образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup> через  $30 \times 10^{-6}$  с от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия, для трещины  $10^{-2}$  м, для двух трещин  $20 \times 10^{-3}$  и  $42 \times 10^{-3}$  м вдоль оси сжатия, каждая на расстоянии  $10^{-2}$  м от краев образца, а также для нескольких трещин, расположенных вдоль оси сжатия с размерами  $(2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 64,0) \times 10^{-3}$  м, расстояние между трещинами  $5 \times 10^{-3}$  м. В последнем случае трещины расположены в порядке возрастания от самой маленькой по длине до самой большой от точки приложения импульса. На рис. 2 и 3 цветовой гаммой отображена интенсивность возникающих в образце напряжений. На них видно, что трещины являются концентраторами напряжений. Из области таких концентраций напряжений будет исходить электромагнитный сигнал с наибольшей амплитудой. Здесь на рис. 2 и 3 ось  $Z$  совпадает с направлением максимального главного напряжения.

При проведении экспериментов первоначально исследовалась электромагнитная эмиссия образцов горных пород скарна и магнетитовой руды разной прочности при их нагружении вдоль оси одноосным сжатием. На рис. 4 приведены усредненные за 1 с амплитуды ЭМЭ скарна в широкой полосе частот 1—100 кГц. Образец содержал кальцит и магнетит. Запись ЭМЭ проводили непрерывно с записью текущих значений сжимающих напряжений  $P$  в интервале от нулевых до разрушающих значений нагружения  $P_{\text{пред}}$ .

На рисунке отмечены этапы развития разрушения, в том числе этап развития деструкции материала образца или прорастания первичных трещин и их рост в интервале 0,3—0,52 относительной нагрузки. Относительная нагрузка является отношением текущей к разрушающей нагрузке  $P/P_{\text{пред}}$ . Подобные изменения амплитуды ЭМЭ наблюдали при развитии деструктивных процессов

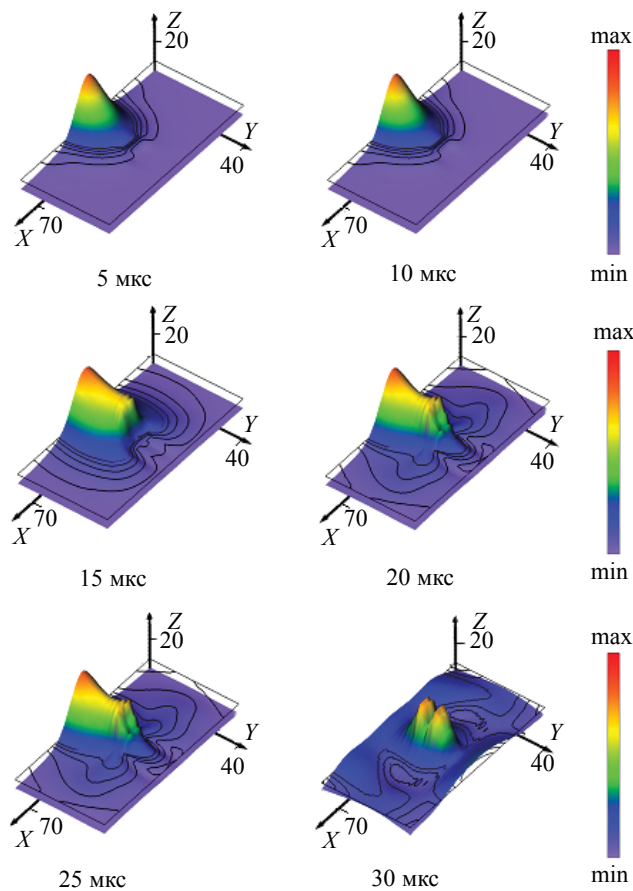
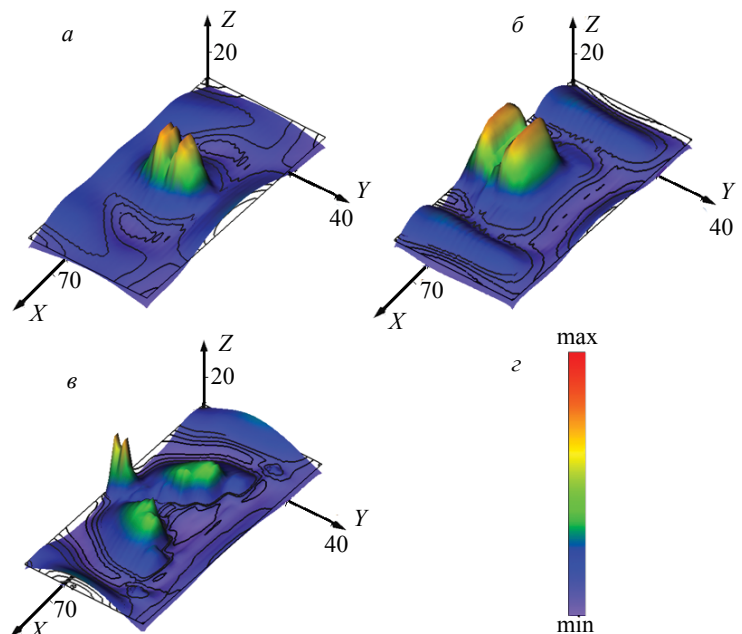


Рис. 2. Численное моделирование изменений во времени интенсивности напряжений в области разреза образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3} \text{ м}^2$  и трещиной  $10^{-2} \text{ м}$  посередине образца вдоль направления сжатия от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия.

Рис. 3. Численное моделирование изменения интенсивности напряжений в области образца с размерами  $(42 \times 80) \times 10^{-3} \text{ м}^2$  через  $30 \times 10^{-6} \text{ с}$  от момента ввода детерминированного акустического импульса на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия:  
*a* — трещина  $10^{-2} \text{ м}$ ; *б* — две трещины  $20 \times 10^{-3}$  и  $42 \times 10^{-3} \text{ м}$  вдоль оси сжатия каждая на расстоянии  $10 \times 10^{-3} \text{ м}$  от краев образца; *в* — область содержит несколько трещин, расположенных вдоль оси сжатия с размерами  $(2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 64,0) \times 10^{-3} \text{ м}$ , расстояние между трещинами  $5 \times 10^{-3} \text{ м}$ , трещины расположены в порядке возрастания от самой маленькой до самой большой от точки приложения импульса; *г* — цветовая гамма интенсивность напряжений.



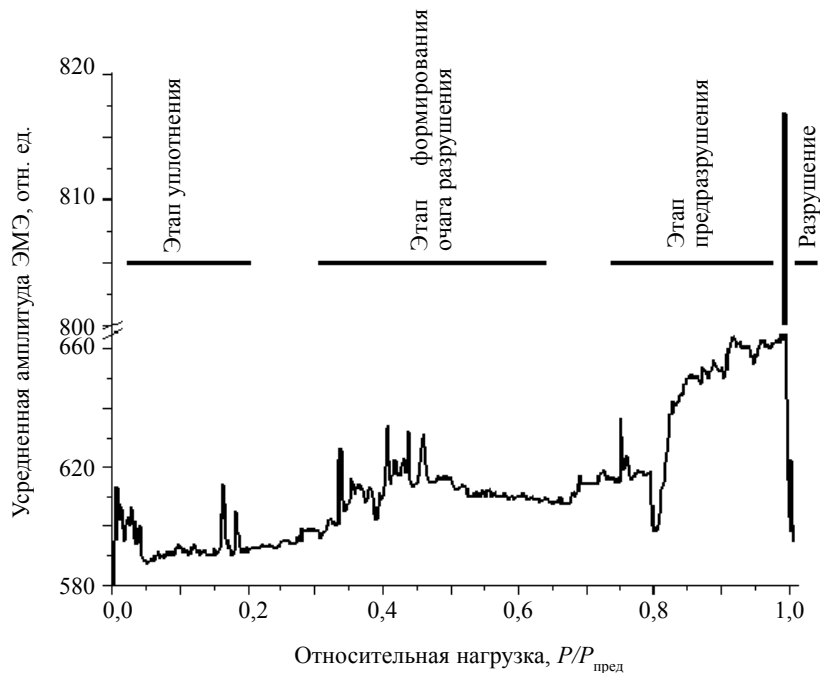


Рис. 4. Изменения усредненных за одну секунду амплитуд ЭМЭ скарна на частоте 100 кГц электромагнитных сигналов при разных значениях относительной нагрузки.

в различных упругих диэлектрических материалах и горных породах. Это обусловлено тем, что при нагружении сжимающими напряжениями хрупких материалов с твердотельными включениями усилия передаются на весь его объем, ограниченный площадью воздействия. Деформация в этом случае подчиняется закону Гука. В результате такого воздействия наиболее хрупкий материал будет разрушаться первым. Так различные модификации кальцита в зависимости от его положения и вида в горной породе имеют прочность  $(12—50) \times 10^6$  Па, в то время как прочность магнетитовой руды существенно выше. В связи с этим зона деструкции в минералах, составляющих породу, будет развиваться в разных промежутках относительной нагрузки  $P/P_{\text{пред}}$ . Это и отображено на рис. 4 при нагружении образца скарна, содержащего около 40 % кальцита и 60 % магнетита. Резюмируя результаты исследования по выявлению влияния минерального состава образцов горных пород на амплитуду ЭМЭ, можно сказать, что присутствующие в материале наименее прочные включения всегда будут первоначально подвергаться деструкции.

Экспериментально было выявлено, что структура материала может существенно влиять на амплитуду ЭМЭ. Для установления такого влияния структуры были подобраны образцы магнетитовой руды разной прочности и с разным содержанием магнетита. В табл. 1 представлены характеристики четырех исследуемых образцов с разным содержанием магнетита и пределом прочности при одноосном сжатии вдоль оси образцов, указаны максимальные амплитуды ЭМЭ на частоте 65 кГц. Видно, что при равном содержании магнетита амплитуда ЭМС в 2,4 раза выше у образца с высокой прочностью 234 против 193 кН у менее прочного. Возрастание содержания магнетита на 8—10 % существенно снижает амплитуду ЭМЭ.

На рис. 5 приведены графики изменений максимальных амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов образцов магнетитовой руды М1, М2, М3 и М4 с разным содержанием магнетита.

На рисунке видно, что образцы с относительно низкой прочностью и с пониженным содержанием магнетита М1 и М2 обладают высокими амплитудами спектральных составляющих электромагнитных сигналов на частоте 65 кГц. У более прочных образцов магнетитовой руды с повышенным содержанием магнетита М3 и М4 спектральные составляющие ЭМС на той же частоте обладают более низкими амплитудами. Эти экспериментальные результаты подтверждают, что структура материала существенно влияет на параметры ЭМЭ и ЭМС. В этом случае, несмотря на близкие усредненные значения удельного электрического сопротивления образцов  $\rho$ , существенное влияние на параметры ЭМЭ оказывает содержание магнетита в руде, так как его собственное  $\rho_{\text{маг}}$  в  $10^4—10^6$  раз меньше, чем у вмещающей его породы.

Характеристики исследуемых образцов магнетитовой руды

Образцы магнетитовой руды	Предельная прочность $P_{пред}$ , кН	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Удельный вес $\sigma$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Содержание магнетита, %	Амплитуда ЭМС (65 кГц), В
M1	234	16	3,4	11,7±1	$800 \cdot 10^{-6}$
M2	193	17	3,4	11,7±1	$350 \cdot 10^{-6}$
M3	317	19	3,7	18,9±1	$12 \cdot 10^{-6}$
M4	258	21	3,8	21,05±1	$3 \cdot 10^{-6}$

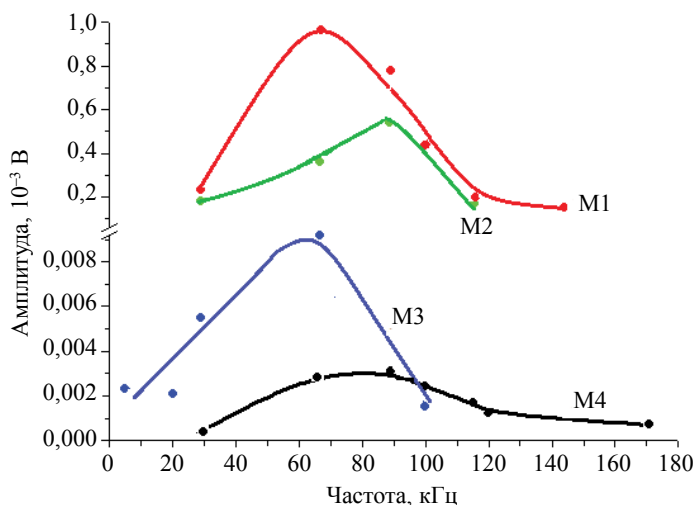


Рис. 5. Графики максимальных амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов на частоте 65 кГц образцов магнетитовой руды M1, M2, M3 и M4 с разным содержанием магнетита.

Таким образом, наличие в образцах минералов с низким удельным электрическим сопротивлением, таких как графит, магнетит, сульфиды или других веществ с подобным  $\rho$ , всегда будет сопровождаться ускоренным частичным или полным стеканием зарядов с бортов вновь образующихся трещин и их нейтрализацией. В результате изменится зарядовое состояние образца и, как следствие, уменьшатся амплитуды ЭМЭ при акустико-электрических преобразованиях как при распространении акустических импульсов от образующихся трещин, так и при внешнем акустическом воздействии.

Наряду с электромагнитной эмиссией проводились исследования параметров электромагнитных откликов на внешнее акустическое возбуждение в процесс «ступенчатого» одноосного сжатия образцов магнетитовой руды. Размеры образцов имели такие же значения, как и при исследованиях ЭМЭ. На «ступеньках» поддерживались выбранные значения нагрузки. Возбуждение на «ступеньках» производили посередине боковой поверхности образца акустическим импульсом, возникающим при ударе шариком. Акустический импульс длительностью по основанию  $50 \times 10^{-6}$  с имел форму близкую к колоколообразному распределению Гаусса.

На рис. 6 приведены закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия модельных образцов магнетитовой руды разной прочности. На рис. 6а, в показаны результаты исследования амплитуды акустико-электрических преобразований при внешнем детерминированном акустическом возбуждении ударом шарика на выбранных уровнях нагружения. Здесь приводятся данных для двух образцов с разными пределами прочности: рис. 6б — 250 кН, рис. 6г — 350 кН. На рис. 6б, г стрелками обозначены моменты введения детерминированного акустического воздействия ударом шарика, а непрерывной линией с полками, отображающими постоянство величин, показано «ступенчатое» нагружение при сжимающих напряжениях. Для создания одноосных сжимающих напряжений в экс-



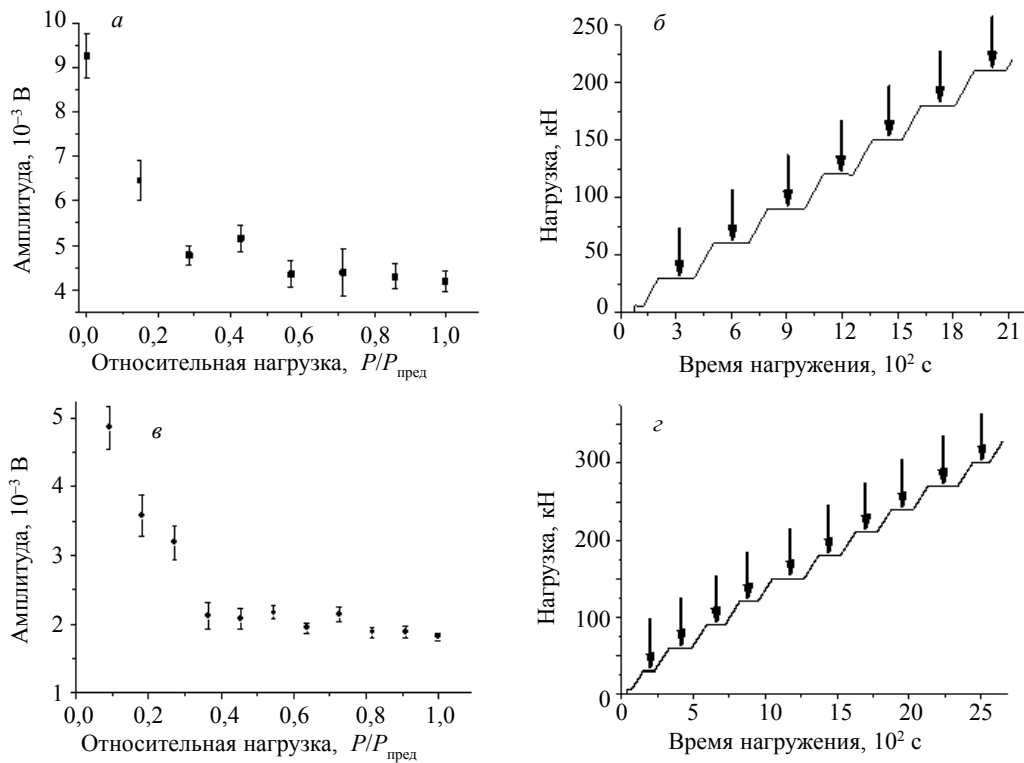


Рис. 6. Закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия модельных образцов магнетитовой руды разной прочности:

*a, в* — амплитуда электромагнитных сигналов; *б, з* — предельная нагрузка разрушения 250 и 350 кН соответственно; стрелками отмечены удары шариком для моделирования акустико-электрических преобразований в процессе «ступенчатого» нагружения образцов.

периментах использовали конфигурацию стенда, представленную на рис. 2*a*. На рис. 6*a, в* видно, что начало увеличения амплитуды ЭМС совпадает с началом этапа развития деструктивных процессов трещинообразования и соответствует значению 0,4 от предельной нагрузки  $P_{\text{пред}}$ , при которой произошло разрушение образца. В дальнейшем процесс развития разрушения нарастал и около 0,7 от  $P_{\text{пред}}$  начал спадать. При этом надо отметить, что для обоих образцов имеются два этапа возрастания амплитуды ЭМС. Это связано со структурой руды, которая содержит менее прочный кальцит и более прочный магнетит. В результате при внешнем акустическом возбуждении также отмечается начало этапа развития деструктивных процессов в материалах, используемых в эксперименте образцов.

Как уже указывалось выше, здесь наряду с увеличением сжимающих усилий задействовано внешнее возбуждение акустико-электрических преобразований. В результате регистрировался одиночный ЭМС, имеющий определенные амплитудно-частотные параметры. При построении закономерностей на рис. 6 использовалась только амплитуды ЭМС. На рисунках видно, что при увеличении сжимающих усилий амплитуда ЭМС падает с возрастанием на определенных участках, соответствующих этапам развития деструктивных процессов в образцах. Падение амплитуды ЭМС однозначно связано с уменьшением амплитуды возбуждающего акустического импульса [1—3]. Такое уменьшение обусловлено возрастанием потерь акустической энергии при распространении акустического импульса на вновь образующихся трещинах в зоне деструкции материала образца. С другой стороны, на бортах вновь образованных трещин присутствует еще не релаксированный заряд. В результате в зоне распространения акустического импульса ЭМС формируется на всем объеме содержащихся в образце пьезоэлектрических включений, а также зарядов на бортах трещин и поверхностях воздушных и твердотельных включений [12]. Если форма акустического импульса нарушается, то ЭМС, как интегральная характеристика, отражает это. В результате ЭМС характеризует изменения напряженно-деформированного состояния материала образца опосредовано через увеличение количества вновь образованных трещин. Если трещин нет, то амплитуда ЭМС формируется возбуждением акустическим импульсом пьезоэлектрических включений и колебанием заряженных поверхностей воздушных и твердотельных включение, а также включений в виде солевых растворов.

## ВЫВОДЫ

Анализ полученных численных расчетов и экспериментальных закономерностей амплитудных и частотных параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии, а также при импульсном акустическом возбуждении диэлектрических структур в процессе развития разрушения исследуемых образцов показал, что при тестировании развития процессов разрушения методами механико-электрических и акустико-электрических преобразований можно выделить некоторые важные особенности.

Так проведенное численное моделирование изменения интенсивности напряжений в материале образцов при детерминированном акустическом возбуждении на середине поверхности, перпендикулярной направлению одноосного сжатия, выявило, что присутствующие в объеме образца трещины являются концентраторами напряжений. При разном количестве и размерах трещин, перпендикулярных распространению акустического импульса, интенсивность напряжений и их вид существенно различается. Так как параметры ЭМС связаны с характеристиками возникающих механических напряжений, то из области таких концентраций будет исходить электромагнитный сигнал с наибольшей амплитудой и с разными амплитудно-частотными спектрами.

Экспериментально полученные результаты электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов скарна и магнетитовой руды разной прочности выявили этапы подготовки разрушения образцов. Возникновение и развитие деструктивных зон находится в интервале от 0,3 до 0,52 от разрушающей нагрузки. При этом надо учесть, что для разных материалов интервал этого диапазона может изменяться в зависимости от их прочности. Показано, что при равном содержании магнетита амплитуда ЭМС в 2,4 раза выше у образца с высокой прочностью 234 против 193 кН у менее прочного. Возрастание содержания магнетита на 8—10 % существенно снижает амплитуду ЭМС. Это обстоятельство указывает на влияние структуры образцов и их диэлектрических свойств на параметры электромагнитных сигналов как при регистрации результатов механико-электрических, так и при акустико-электрических преобразованиях.

При проведении экспериментальных исследований модельных образцов магнетитовой руды разной прочности с возбуждением их на «ступеньках» нагружения детерминированными акустическими импульсами получены определенные закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при акустико-электрических преобразованиях в условиях роста одноосного сжатия. Здесь так же, как и при наблюдении ЭМЭ, выделяется этап возникновения и развития деструктивных зон с последующим спадом амплитуды ЭМС.

Таким образом, по виду амплитудно-частотного спектра при детерминированном акустическом возбуждении появляется возможность определять наличие появляющихся трещин в процессе развития разрушения образца различными видами силового нагружения. Использование методов механико-электрических и акустико-электрических преобразований при силовом нагружении сжатием будет полезным при тестировании процессов начала трещинообразования и развитии процессов разрушения в твердотельных диэлектрических материалах и изделиях. В дальнейшем рассмотренные методики могут использоваться для обнаружения любых дефектов в диэлектрических материалах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-10156 (ТПУ - 19.0066.РНФ.2020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bespalko A.A., Gol'd R.M., Yavorovich L.V., Datsko D.I.* Excitation of electromagnetic radiation in laminated rocks under acoustic influence // *Journal of Mining Science*. 2003. V. 39. No 2. P. 112—117.
2. *Bespalko A.A., Yavorovich L.V., Viitman E.E., Fedotov P.I., Shtirts V.A.* Dynamoelectric energy transfers in a rock mass under explosion load in terms of the Tashtagol mine // *Journal of Mining Science*. 2010. V. 46. No 2. P. 136—142.
3. *Fursa T.V., Dann D.D., Demikhova A.A.* On the relationship between the parameters of the electric response to pulsed mechanical exposure and the formation of cracks in concrete // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. No 9. P. 548—552. <https://doi.org/10.1134/S1061830914090058>
4. *Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н.* Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // *ДАН СССР*. 1975. Т. 220. № 1. С. 82—85.
5. *Misra A., Gosh S.* Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure // *Appl. Phys*. 1980. V. 23. P. 387—390.
6. *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.

7. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // *Phys. Earth Planet. Int.* 1989. V. 57. No 1—2. P. 157—168.
8. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 6245—6249.
9. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Баумбах Х., Каппхан Г., Словик В., Биркхольц В. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов // *Дефектоскопия.* 1992. № 7. С. 76—80.
10. 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.
11. 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.
12. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // *Физическая мезомеханика.* 2004. Т. 7. № 5. С. 95—99.
13. Lacidogna, G., Carpinteri A., Manuello A., G. 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.
14. 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. V. 52. No. 2. P. 279—285.
15. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.P., Dann D.D., Utsyn G.E., Petrov M.V. and Pomishin E.K. Modelling Acoustic–Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2021. V. 57. No. 2. P. 85—95.
16. 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.
17. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
18. Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid State Physics.* Thomson Learning, Inc., 1976. 848 p.
19. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. 296 с.
20. Зеггер К. Физика полупроводников / Пер с англ. под ред. Ю. К. Пожелы. М.: Мир, 1977. 616 с.
21. Bepal'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.
22. Машков Ю.К., Кропотин О.В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 324 с.
23. Rabinovitch A., Shay A., Liraz R., Frid V., Bahat D. Electromagnetic radiation emitted during friction process // *International Journal of Fracture.* 2005. V. 131. No. 2. P. 21—27.
24. Вишневецкая Н.Л., Защинский Л.А. Расчет напряженности самосогласованного электрического поля, возникающего в диэлектрике при механическом напряжении // *Известия ВУЗов. Физика.* 1977. № 5. С. 71—74.
25. Khorsov P., Laas R., Surzhikov A.P. The Application of Reverberation in Method of Mechano-electrical Transformations for Estimation of Stress-Strain State in Solid Dielectrical Matter // *Material Science Forum.* 2019. V. 970. P. 47—54.
26. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Справочник геофизика. М.: Недра, 1976. 527 с.
27. Мооса шкала / Большая российская энциклопедия: в 35 т. Гл. ред. Ю. С. Осипов. М.: Большая российская энциклопедия, 2004—2017.
28. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика / Учеб. для вузов. М.: Недра, 1991. 368 с.
29. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822 [Electronic resource]. Access mode: [www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com)
30. Ziman J.M. *Principles of the Theory of Solids.* Cambridge University Press, London, 1972. 435 p.
31. Давыдов А.С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.
32. *Physical Acoustics* / Edited by W.P. Mason. V. 1. New York: Academic Press, 1964. 532 p.
33. 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.
34. Бараиков В.Н., Герасимов А.В., Люкин Б.А. Прогнозирование разрушения промышленных установок // *Химическая промышленность.* 1998. № 10. С. 657—661.
35. Hoffman J. D. *Numerical methods for engineers and scientists/* Second edition revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. 840 p.
36. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems.* 2nd ed. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1996.