

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский Томский политехнический университет**

На правах рукописи

Ло Цзюньхуа

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТРЁХМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И
ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ В ТВЁРДОТЕЛЬНЫХ И ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ АКУСТИКО-
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и
природной среды

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Беспалько Анатолий Алексеевич

Томск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Обзор методов неразрушающего контроля твердых материалов.....	12
1.1 Способ акустического контроля	12
1.2 Способ электромагнитного контроля.....	17
1.3 Метод неразрушающего контроля, основанный на акустико-электрических преобразованиях	25
Выводы по главе 1	29
ГЛАВА 2. Методы и методики экспериментальных исследований и анализа электромагнитных сигналов.....	32
2.1 Измерение параметров акустических и электромагнитных сигналов в экспериментальных исследованиях	32
2.2 Методы обработки сигналов	39
Выводы по главе 2	44
ГЛАВА 3. Теоретические исследования методов трехмерного позиционирования дефектов твердотельных материалов	46
3.1 Введение в акустоэлектрическое преобразование сигнала в физическом эксперименте и измерениях	46
3.1.1 Введение в преобразование акустико-электрического сигнала в численное моделирование	48
3.1.2 Алгоритм определения времени прихода продольной акустической волны .	49
3.2 Моделирование акустико-электрических преобразований дефектных диэлектрических материалов при импульсном акустическом возбуждении	55
3.3 Решение проблемы недостаточной частоты дискретизации данных измерений .	58
3.3.1 Алгоритм подгонки кривой кубического В-сплайна	58

3.3.2 Алгоритм подгонки кубической сплайновой кривой	60
3.3.3 Алгоритм вейвлет-подгонки.....	61
3.3.4 Сравнение эффектов различных алгоритмов подгонки	61
3.4 Локация дефектов на основе модели генерации электромагнитных сигналов в процессе акустико-электрического преобразований.	65
3.4.1 Эксперименты по моделированию акустико-электрического преобразования внутренних дефектов различных размеров в диэлектрических материалах	65
3.4.2 Алгоритм трехмерной локализации дефектов	69
3.5. Разработка метода прихода Р-волн для сигналов от трещин на примере упругих диэлектрических материалов в условиях сильного шума.....	77
3.6 Физическая экспериментальная проверка алгоритма позиционирования	85
Выводы по главе 3	91
Глава 4. Экспериментальные исследования параметров электромагнитных сигналов при внешнем детерминированном акустическом возбуждении модельных образцов.....	94
4.1 Экспериментальные исследования параметров электромагнитных откликов на внешнее детерминированное акустическое возбуждение модельных образцов бездефектных и дефектных материалов при ступенчатом нагружении сжатием и сдвигом	94
Выводы по разделу 4.1 Главы 4	105
4.2 Акустоэлектрические преобразования в твердом диэлектрике, контактирующем с солевыми растворами.....	108
Выводы по разделу 4.2 главы 4	119
ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время все больше диэлектрических материалов и гетерогенных диэлектрических структур используются в изделиях, подвергающихся механическим нагрузкам. Однако в процессе их изготовления или эксплуатации неизбежно возникают дефекты, включая поры и трещины, которые негативно влияют на эксплуатационные характеристики и надежность изделий, что в конечном итоге может привести к их выходу из строя. В связи с этим, неразрушающий контроль приобретает ключевое значение для раннего выявления дефектов и их мониторинга в режиме реального времени. Поэтому разработка новых методов и средств их реализации для мониторинга, локализации и контроля возникновения и развития дефектов, а также определения прочности и стадий разрушения гетерогенных диэлектрических структур при изменении их напряженно-деформированного состояния имеет важное значение. Такими новыми методами тестирования диэлектрических структур с дефектами из различных материалов, а также образования и развития трещин в материалах и изделиях являются электромагнитные методы, основанные на механико-электрических и акустико-электрических преобразованиях на двойных электрических слоях, возникающих на бортах трещин и контактов материалов дефектов и вмещающих их материалов, отличающихся акустическими и электрическими характеристиками.

Развитие разрушения твердотельных диэлектрических структур сопровождается акустическими импульсами, а также возникновением электромагнитных полей, вызванных изменением зарядового состояния бортов трещин. Изменение напряженно-деформированного состояния твердотельных структур под действием механических нагрузок сопровождается акустической эмиссией в исследуемом материале. Возникающие акустические импульсы вызывают колебания заряженных краев окружающих и развивающихся трещин, контактных точек материала и дефектов. В результате генерируются множественные электромагнитные сигналы, которые определяются как электромагнитная эмиссия.

При наличии дефектов или при появлении и росте трещин в твердотельных диэлектрических материалах и структурах внешнее акустическое воздействие также может приводить к возникновению электромагнитных сигналов. Связь между внешним акустическим воздействием и генерацией электромагнитных сигналов называется акустико-электрическим преобразованием. В этом случае параметры электромагнитных сигналов определяются свойствами акустического возбуждающего сигнала. Следовательно, при помощи внешнего детерминированного акустического воздействия можно успешно тестировать процесс образования трещин независимо от типа возрастающей механической нагрузки, особенно когда слои исследуемого диэлектрического материала подвергаются одноосному сжатию или сдвигу.

Исследование закономерностей изменения характеристик электромагнитной эмиссии и параметров электромагнитных сигналов при увеличении нагрузки и внешнем акустическом воздействии на диэлектрические материалы и структуры поможет разработать механико-электрические и акустико-электрические методы для непрерывного тестирования процессов образования трещин и разрушения. Для контроля дефектности и развития разрушения диэлектрических структур предпочтительным является метод акустико-электрических преобразований. При этом знание времени прихода первой волны сигналов акустико-электрического преобразования позволяет выполнить трехмерную локализацию внутренних дефектов в твердотельных диэлектрических материалах. Подобные работы имеют практическую значимость и требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Степень разработанности темы диссертации

На протяжении многих лет сотрудники Проблемной научно-исследовательской лаборатории «Электроники, диэлектриков и полупроводников» (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета изучали явление генерации сигналов и изменение их параметров при механико-электрических и акустико-электрических преобразованиях применительно к контролю развития геодинамических явлений в горных массивах, для контроля разрушения

диэлектрических материалов в процессе механических сжимающих и сдвиговых нагружений, а также для тестирования дефектности твердотельных диэлектриков. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Суржигов А.П., Беспалько А.А. и другие сотрудники ПНИЛ ЭДиП исследовали акустико-электрические преобразования на примере модельных дефектных образцов из цементно-песчаной смеси. Было выявлено влияние единичных и множественных воздушных и металлических дефектов на параметры электромагнитных откликов (ЭМО) на внешнее акустическое возбуждение. Выявлены определенные закономерности при наложении внешних постоянных электрических и магнитных полей на амплитудно-частотные параметры ЭМО при их акустическом возбуждении.

Научные группы Мексиканского института нефти исследовали электромагнитное поле, генерируемое рассеянием акустических волн на пороупругом включении, расположенном в жидкости. Многочисленные исследования ведут китайские ученые. Так Чжан Ю. и сотрудники исследовали характеристики электромагнитных волн в процессе сейсмико-электрических преобразований в скважине. Другая группа китайских ученых Чжан Г. с сотрудниками исследовали в реальных условиях моделирования скважин, заполненной жидкостью, характеристики формы волны акустико-электрического преобразования. Хе Х. и его научная группа разрабатывают метод, сочетающий технологии акустической эмиссии и электромагнитного излучения, для определения распространения трещин в угольно-породных массивах и прогнозирования их разрушения в лабораторных условиях.

В настоящее время остаются многие вопросы: связанные с процессами обработки и анализа генерируемых электромагнитных сигналов при акустико-электрических преобразованиях; определения места расположения дефектов в тестируемом диэлектрическом материале по амплитудным параметрам ЭМО при внешнем детерминированном акустическом воздействии и времени прихода электромагнитного сигнала на принимающий датчик. Кроме того, для целей неразрушающего контроля нет детальных исследований ЭМО для выявления

дефектности диэлектрических материалов при их комплексном нагружении сжатием или сдвигом и внешним акустическим зондированием. Не изучено влияние контактов пористых твердых диэлектриков с водными солевыми растворами с разным молярным весом катионов и анионов на параметры ЭМО при внешнем акустическом возбуждении, в том числе с целью определения дефектности таких материалов.

Объект исследования: амплитудно-частотные параметры электромагнитных откликов, вызванных детерминированным акустическим возбуждением в диэлектрических твердотельных материалах.

Предмет исследования: разработка численного метода локализации дефектов в твердых диэлектрических материалах на основе параметров акустико-электрических преобразований; закономерности изменения параметров акустико-электрических преобразований в диэлектрических твердотельных материалах, в том числе при комплексном нагружении образцов напряжениями сжатия или сдвига и внешним импульсным акустическим воздействием; при внешнем акустическом возбуждении выявление закономерностей изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных откликов двойных электрических слоев, образованных водными солевыми растворами разной концентрации и молярными весами анионов и катионов с твердотельными пористыми образцами, а также использование этих закономерностей в дефектоскопии.

Цель диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование, разработка и совершенствование метода акустико-электрических преобразований для неразрушающего контроля, направленное на повышение точности локализации дефектов, мониторинг стадий их развития в твердотельных диэлектриках при комплексном нагружении, а также на расширение функциональных возможностей метода для количественной оценки минерализации пористых материалов.

Задачи диссертационной работы:

1. Осуществить численное и экспериментальное трехмерное позиционирование внутренних объемных дефектов в твердотельных образцах на основе акустико-электрических преобразований.

2. Выявить особенности акустико-электрических методов мониторинга разрушения твердотельных диэлектриков при комбинированных нагрузениях сжатием или сдвигом и применением внешнего зондирования детерминированным акустическим импульсом на разных этапах подготовки этого разрушения.

3. Определить закономерности влияния минерализации (концентрации и ионного состава солей) на амплитудно-частотные параметры электромагнитных откликов двойных электрических слоёв на примере контактов солевых растворов и отвержденных цементно-песчаных смесей, а также использование этих закономерностей в дефектоскопии.

Методы исследования

При выполнении теоретических и экспериментальных исследований использовалось стандартное и специально разработанное оборудование. При обработке полученных в экспериментах результатов использовались: физическое моделирование, амплитудно-частотный, корреляционный и частотно-временной методы анализа.

Научная новизна работы

1. Разработан и экспериментально обоснован комплексный подход к диагностике и локализации дефектов в твёрдых и пористых материалах, а также к оценке минерализации водных растворов, основанный на анализе параметров электромагнитного отклика при внешнем детерминированном акустическом воздействии. В рамках этого подхода впервые реализованы:

- новый 3D-метод локализации дефектов в объёмных гетерогенных структурах по данным акустико-электрических преобразований, учитывающий параметры акустических импульсов и время прихода Р-волны;

- алгоритм точного определения времени первого вступления сигнала (CEEDMAN +

вейвлет + STA/LTA + AIC), обеспечивающий высокую точность и устойчивость к шумам;

- методика мониторинга стадий разрушения материалов и количественной оценки минерализации по амплитудно-частотным характеристикам электромагнитного отклика.

2. Экспериментально и численно доказано, что ключевые параметры электромагнитного отклика (амплитудно-частотные, временные) при акустико-электрических преобразованиях определяются не только геометрией и расположением дефектов, но и физико-химическими свойствами пористых материалов и двойных электрических слоёв на границах фаз, что позволяет использовать данный метод для решения широкого круга задач неразрушающего контроля и анализа состава сред.

Теоретическая и практическая значимость

1. Предложен и теоретически обоснован метод трехмерной локации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования и метода CEEDMAN+вейвлет+STA/LTA+AIC, в том числе в условиях сильной электромагнитной зашумленности электромагнитного отклика на внешнее импульсное детерминированное акустическое воздействие.

2. Предложен и теоретически обоснован метод импульсного акустического зондирования процесса развития разрушения материалов, в том числе и пористых, на основе акустико-электрических преобразований.

3. Предложен и экспериментально обоснован метод акустико-электрических преобразований для определения характеристик дефектности пористых материалов, использующий контакты границ дефектов и водных растворов солей, при этом материалы дефекта и вмещающего материала должны отличаться акустическим импедансом и (или) удельным электрическим сопротивлением.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы представлялись на международных конференциях «Перспективы развития фундаментальных наук», материалы которого представлены в Сборнике трудов XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, (г. Томск, 2024 г.); на XI Международная конференция по передовым производственным технологиям и материаловедению (г. Гуанчжоу, 2024 г.), а также на двух семинарах Специального конструкторского бюро «Смена» Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методики подавления электромагнитных шумов в электромагнитных сигналах на основе анализа методами CEEDMAN + вейвлет и точного определения времени первого вступления электромагнитных сигналов при акустико-электрических преобразованиях в твердотельных материалах с внутренними дефектами, основанный на методе STA/LTA + AIC.
2. Новый трёхмерный метод локализации внутренних дефектов в объёмных твердотельных структурах, реализованный на основе акустико-электрического преобразования и подтверждённый численным и экспериментальным моделированием.
3. Способ диагностики стадий зарождения и развития зон разрушения в диэлектрических материалах по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных откликов при внешнем импульсном акустическом воздействии в процессе ступенчатого нагружения модельных образцов сжатием или сдвигом, в том числе на цементно-песчаные смеси с дефектами.
4. Метод количественной оценки минерализации водных растворов солей по вариациям амплитудно-частотных параметров электромагнитных откликов двойных электрических слоёв на границе солевой раствор–пористый твёрдый образец при акустическом импульсном воздействии, а также применение акустико-электрического метода для идентификации дефектов в пористых материалах, различающихся акустическим импедансом и/или удельным электрическим сопротивлением.

Достоверность научных положений и научных выводов настоящего исследования обусловлена получением достаточного объема экспериментальных данных путем проведения лабораторных исследований, использованием современного экспериментального оборудования и проведением обработки данных по стандартным и специализированным методикам, а также соответствием полученных результатов физическим законам изучаемого процесса.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в тексте данной диссертационной работы, получены автором, либо при его личном и непосредственном участии. Автор участвовал в формулировании целей и задач исследований, планировал и проводил исследовательские эксперименты, а также проводил обработку, обобщение и анализ экспериментальных результатов.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 6 статей в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 2 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименования и приложения. Работа содержит 142 страницу, 11 таблиц и 52 рисунка.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время твердые диэлектрические материалы, все более активно применяются в производстве изделий, подверженных механическим нагрузкам. Однако в процессе их изготовления или эксплуатации неизбежно возникают дефекты, включая поры и трещины, которые негативно влияют на эксплуатационные характеристики и надежность изделий, что в конечном итоге может привести к их выходу из строя. В связи с этим, неразрушающий контроль приобретает ключевое значение для раннего выявления дефектов и их мониторинга в режиме реального времени. При механическом воздействии на материал происходит высвобождение его внутренней энергии в виде упругой, акустической [1-7] и электромагнитной энергии [8-11]. Для неразрушающего контроля используются широко известные магнитные, радиоволновой, радиационные и оптические методы, тепловой, электрический, электромагнитный и другие виды контроля [12-15]. Учитывая, что в диссертации исследуется акустико-электромагнитный неразрушающий контроль дефектности диэлектрических материалов на примере цементно-песчаных образцов, то представляется целесообразным рассмотреть применения акустических и электромагнитных методов в неразрушающем контроле твердых материалов. В данном разделе рассматриваются соответствующие технологии, основанные на принципах акустики и электромагнетизма, а также систематизируются сведения о принципах работы, технических характеристиках и текущем состоянии исследований в этой области.

1.1 Способ акустического контроля

Акустические характеристики контролируемых диэлектрических материалов широко применяются для выявления дефектов и неоднородностей в изделиях из них. Это позволяет определять размеры дефектов, их местоположение, количество и характеристики. В настоящее время существует шесть широко распространенных методов неразрушающего контроля,

основанных на акустических принципах: метод ударной волны, ультразвуковой скоростной метод, резонансный метод, метод акустической эмиссии, акустико-ультразвуковой метод и методы томографической визуализации [15]. Методы акустического мониторинга подразделяются на два типа [1-5]: активные (предполагающие передачу и прием акустических колебаний и звуковых волн) и пассивные (основанные исключительно на регистрации вибраций и звуковых волн). Поскольку в численных расчетах и экспериментальных исследованиях, представленных в диссертации, используются акустические возбуждения электромагнитных сигналов, то далее будет подробно рассмотрен акустико-ультразвуковой метод. Акустические методы хорошо изучены и находят на практике широкое применение. Благодаря акустическим методам становится возможным осуществлять непрерывный контроль качества твердых материалов как в процессе изготовления изделий, так и после их производства.

1.1.1 Акустико-ультразвуковой метод

Основной принцип работы акустико-ультразвукового метода заключается в возбуждении исследуемого объекта акустическими или ультразвуковыми упругими волнами определенной частоты или длительности. С помощью специализированных приборов для анализа сигналов данный метод позволяет определить распределение дефектов внутри объекта, а также оценить их механические свойства. Акустико-ультразвуковые методы основаны на различиях в частоте импульсов, их длительностях и потерях при прохождении волн через различные среды и находят широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии, измерении толщины, дальнометрии, дистанционном управлении, ультразвуковой визуализации и других областях.

Внутренние дефекты материала могут быть выявлены благодаря изменению акустических характеристик при распространении акустических или ультразвуковых волн. К таким характеристикам относятся скорость распространения, длительность импульса, затухание и частота импульсной последовательности. Эти четыре параметра являются ключевыми

критериями для оценки внутренних повреждений среды с использованием акустико-ультразвуковых технологий. Ян и соавторы [16] предложили метод трехмерной ультразвуковой реконструкции пустот и трещин, представленных узлами контура. Хотя данный метод позволяет получать трехмерные изображения дефектов различной формы и размеров, погрешность реконструкции в большинстве случаев составляет менее 10%, а максимальная погрешность не превышает 22%. В работе [17] для синхронного неразрушающего контроля поверхностных и внутренних дефектов в металлических изделиях предложено совместное использование электромагнитно-ультразвуковая многомодальной системы. Метод электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования является способом неразрушающего контроля, в котором возбуждение ультразвука происходит непосредственно в проводящем материале (металле) за счет взаимодействия электромагнитного поля индуктора с магнитным полем объекта. В отличие от пьезоэлектрического, метод не требует контактной жидкости, работает при высоких температурах. В этом методе используется ЭМА-преобразователь (ЭМАП), состоящий из индуктора (катушки с ВЧ-током) и магнитной системы (постоянный магнит или электромагнит). Вихревые токи, наведенные в поверхностном слое, взаимодействуют с внешним магнитным полем, создавая упругие колебания (ультразвук). Такой неразрушающий контроль может быть использован и в диэлектрических материалах с металлическими дефектами.

Метод UCT (Ultrasonic Computer Tomography, ультразвуковая компьютерная томография) [18, 19] использует цифровые сигналы, преобразуемые в изображения для распознавания, создает цветные карты компьютерной томографии и формирует трехмерные модели повреждений для последующего анализа. По сравнению с традиционными методами ультразвукового контроля, UCT значительно повышает точность и эффективность обнаружения дефектов. Основное преимущество этого метода заключается в высокой степени визуализации внутреннего качества материала благодаря представлению данных в виде изображений. Однако при обнаружении сквозных трещин в твердых диэлектрических материалах, в том числе в горных породах,

наблюдается недостаточная чувствительность к масштабу трещин, что ограничивает возможности метода качественной оценкой. Для дальнейшего развития метода требуется исследование алгоритмов, более подходящих для анализа нерегулярных поперечных сечений, путем оптимизации плотности сетки [20], расположения фазированной антенной решетки [21], а также других ключевых параметров, таких как выравнивание, для повышения точности измерений. В настоящее время остается невозможным количественно оценить внутренние повреждения, а также обнаружить и измерить трещины в каменных деталях сложной формы в меньшем масштабе.

1.1.2 Метод акустической эмиссии

Акустико-эмиссионный контроль (АЭ) является современным методом неразрушающего контроля и диагностики, основанный на регистрации упругих волн, возникающих в материалах при развитии дефектов в них. Технология АЭ представляет собой хорошо изученный метод неразрушающего контроля, применяемый при исследовании материалов и мониторинге конструкций в реальных условиях. Данная технология позволяет идентифицировать развитие трещин путем регистрации высокочастотных упругих волн или последовательности импульсных акустико-ультразвуковых сигналов, генерируемых в процессе разрушения материала [1-3, 21-25]. Анализ характеристик формы сигнала может быть использован для определения местоположения и степени выраженности трещин, а также для оценки основного механизма разрушения на основе анализа различных режимов разрушения, каждый из которых характеризуется уникальными параметрами сигнала [26–37]. Акустическая эмиссия широко применяется для мониторинга состояния промышленных конструкций, контроля механических характеристик материалов и в других областях, отличаясь высокой надежностью и устойчивостью [38].

Сочетание испытаний на одноосное сжатие с мониторингом акустической эмиссии позволяет углубить понимание поведения материала. Использование АЭ-мониторинга при

проведении испытаний на одноосное сжатие способствует более точному анализу процессов деформации и разрушения [35-37]. Параметры АЭ, такие как общее количество импульсов, их амплитуда и частота повторения, отражают стадии развития трещин [32]. Сопоставление данных АЭ с динамикой напряжений и деформаций при одноосном сжатии помогает определить механические свойства материала и детализировать процессы его разрушения. Это позволяет оценить размер, форму и количество микротрещин, а также их прогрессирование и направление в процессе деформации и разрушения. АЭ-технология способна точно обнаруживать внутренние дефекты, особенно трещины или диффузионные процессы [39]. Сигналы АЭ могут служить индикаторами распространения трещин и использоваться для количественной оценки выделяемой энергии. Данные АЭ обычно анализируются по таким параметрам, как частота, форма, время, пиковая и центроидная амплитуда, и собираются с помощью датчиков в процессе производства для последующего анализа [40, 41].

При испытаниях на одноосное сжатие параметры сигналов акустической эмиссии, такие как амплитуда и частота возникновения событий, коррелируют с осевым напряжением и деформацией образца горной породы. Однако величина напряжения не имеет прямой связи со скоростью акустической эмиссии и ее энергетическими параметрами. Параметры АЭ также позволяют прогнозировать степень повреждения горных пород и цементных растворов, а также оценивать влияние влажности на характер разрушения. Эти параметры помогают понять природу сейсмических предвестников разрушения и закономерности эволюции деформационных процессов. Кроме того, механические параметры твердых материалов могут быть определены на основе данных акустической эмиссии, регистрируемых при сжатии или растяжении образцов.

Большинство современных технологий локализации источников акустической эмиссии применимы только для изотропных и однородных материалов. В случае анизотропных материалов часто требуется предварительное знание скорости распространения звука или характеристик материала в конструкции. Если свойства материала неизвестны, возникают

сложности, связанные с необходимостью использования большого количества сенсорных матриц или решения сложных нелинейных систем уравнений. Существует ограниченное количество методов локализации источников акустической эмиссии, учитывающих отражение звуковых волн в неоднородных структурах, и большинство из них основаны на сложных и громоздких алгоритмах.

Основным недостатком пассивных акустических методов диагностики состояния изделия является осуществление надежного акустического контакта принимающего датчика с объектом контроля. Ненадежность контакта сильно затрудняет, а часто делает невозможным осуществление диагностики действующих характеристик изделия и его дефектности. Это обстоятельство при активных методах контроля с использованием пьезоэлектрических датчиков и ввода с помощью них внешних возбуждающих периодических или импульсных акустических сигналов значительно усиливается. В обоих случаях введения и приема акустических сигналов требуется надежный и воспроизводимый акустический контакт. Возбуждение акустических импульсов в диагностируемых материалах и изделиях путем ударного воздействия не требует такой надежности контакта ввода акустического импульса.

1.2 Способ электромагнитного контроля

Среди методов неразрушающего контроля выделяется класс технологий, основанных на изменениях электромагнитных свойств материалов, которые используются для выявления дефектов и оценки работоспособности материалов и компонентов. Эти методы, объединенные под общим названием технологий электромагнитного обнаружения, базируются на фундаментальных принципах электромагнетизма. К ним относятся вихретоковый метод, порошковый метод, метод магнитной утечки, метод измерения диэлектрической проницаемости, терагерцовый метод, метод электромагнитно-акустического преобразования и другие [42-45]. Благодаря развитию электромагнитного неразрушающего контроля стало возможным проведение

количественной оценки дефектов и их трехмерной визуализации [45]. В дальнейшем будут рассмотрены такие методы, как вихретоковый метод, метод измерения диэлектрической проницаемости, а также методы, основанные на рентгеновском и электромагнитном контроле.

1.2.1 Метод вихревых токов обнаружения дефектов

Вихретоковый метод детектирования представляет собой один из видов неразрушающего контроля, применяемый для выявления неоднородностей в материалах на основе электромагнитных принципов без необходимости обработки поверхности. Данный метод основан на анализе колебаний индуцированного тока в материале в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. Закон электромагнитной индукции Фарадея гласит, что электродвижущая сила ϵ (ЭДС) в замкнутом контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром $\epsilon = -d\Phi_B/dt$, где ϵ – ЭДС, $\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ – магнитный поток, знак «минус», в соответствии с правилом Ленца показывает, что индукционный ток направлен так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока. Здесь B – векторная величина магнитной индукции, S – площадь контура, через который проходит магнитный поток под углом α . Этот закон объясняет возникновение тока при изменении магнитного поля, движении проводника или деформации контура и лежит в основе работы электрогенераторов и трансформаторов. Технология предполагает использование переменного тока, протекающего через первичную обмотку, для создания колеблющегося магнитного поля. При сближении первичной обмотки и материала в компоненте возникают вихревые токи. Наличие дефектов приводит к изменению распределения вихревых токов и генерации противоположных магнитных полей. Однако данный метод не позволяет визуально определить форму и размер дефекта, а его применение ограничено определенными типами материалов. В основном он используется для контроля токопроводящих материалов или неметаллических объектов в диэлектрических заготовках, трубах и т.д. Кроме того, обнаружение глубоко

расположенных дефектов затруднено, а точность детектирования остается относительно низкой [46].

1.2.2 Метод определения диэлектрической проницаемости

Метод измерения диэлектрических свойств позволяет выявлять дефекты материалов путем анализа изменений их диэлектрических характеристик. Основным устройством для таких измерений являются плоские емкостные датчики, которые обладают рядом преимуществ, включая одностороннее возбуждение сигнала, регулируемую амплитуду сигнала и возможность томографической визуализации [47].

Емкостная томография (ЕСТ) основана на взаимодействии электрического поля с материалом диэлектрика, в частности на электромагнитных явлениях, связанных с измерением емкости в присутствии контролируемого изделия. Этот метод использует разницу в диэлектрической проницаемости различных материалов внутри объекта для построения изображения. Диэлектрическая проницаемость (или относительная диэлектрическая проницаемость) является мерой реакции материала на электрическое поле. Различные вещества (такие как металл, воздух, вода и т.д.) обладают разной диэлектрической проницаемостью, что влияет на распространение электрических полей [48]. Когда электрическое поле проходит через такие вещества, разница в диэлектрической проницаемости изменяет распределение электрического поля, что, в свою очередь, влияет на измеренное значение емкости. Емкостной датчик регистрирует эти изменения электрического поля, а затем фиксирует внутреннюю информацию объекта. Сбор и обработка этих данных позволяют получить томографическое изображение внутренней структуры объекта, что дает возможность оценить наличие пузырьков, трещин или пустот внутри композитного материала.

В работах [47,48], показаны результаты разработки в Китае 12-электродного датчика, в которой я принимал активное участие, обучаясь в аспирантуре ТПУ. Фотография

экспериментальной установки с 12-электродным датчиком приведена на рисунке 1.1, которая использовалась для выявления дефектов внутри объектов контроля.

Вращение 12-электродного датчика осуществляется с помощью шагового двигателя и зубчатой передачи, что позволяет легко изменять положение электрода при измерении. Поворачивая электрод-датчик четыре раза с шагом 6° от исходного положения, было получено пять независимых наборов данных, содержащих 66 измерений емкости. Затем итерационный алгоритм Landweber, основанный на регуляризации Тихонова, применяется для решения обратной задачи каждого набора данных для получения 5 реконструированных изображений.

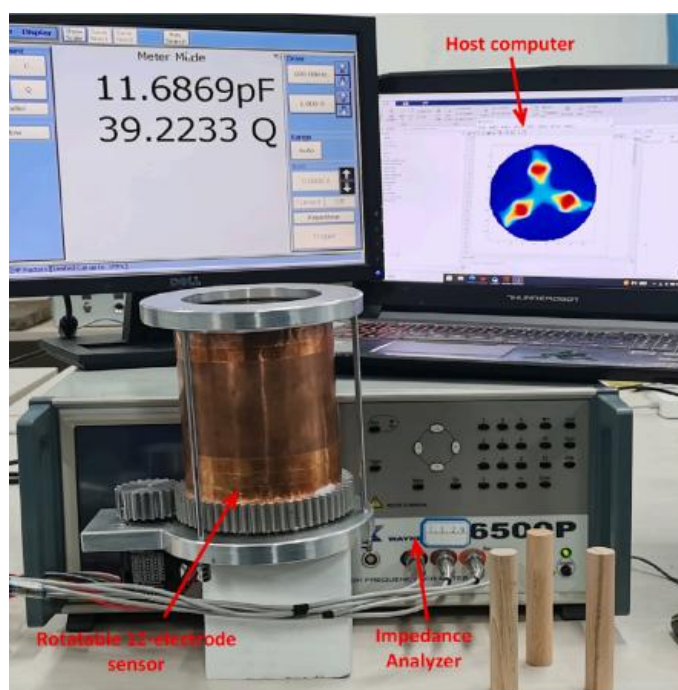


Рисунок 1.1 – Экспериментальная установка

Наконец, пять реконструированных изображений объединяются по отдельности с использованием различных алгоритмов слияния, таких как метод средневзвешенного слияния, метод адаптивного взвешенного слияния PCA и два правила слияния вейвлет-преобразования. Эффект показан на рисунке.1.2, который позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты объекта и которые можно визуально идентифицировать. Однако этот эффект нельзя пока использовать для обнаружения внутренних дефектов диэлектрических твердотельных материалов, которые на данном этапе невозможно определить визуально.

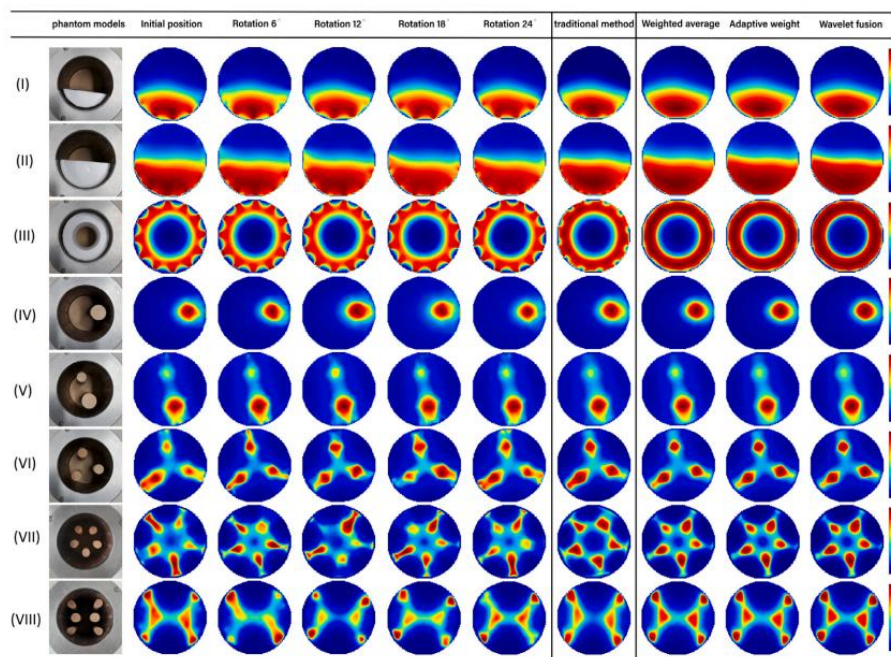


Рисунок 1.2 – Результаты реконструкции изображения вращающегося электродного датчика при экспериментальном измерении

Ёлектроёмкостная томография в основном используется для обнаружения изменений структуры и плотности объектов. Однако он может быть не столь эффективен, как, например, ультразвук, при обнаружении определенных дефектов в твердотельных диэлектрических материалах в виде микротрещин, коррозий или небольших по геометрическим размерам дефектов.

1.2.3 Рентгеновский контроль

В рентгенографическом контроле тестируемая изделие помещается между источником излучения и детектором. Различия в плотности и толщине материала испытываемой детали ослабляют (то есть уменьшают) проникающее излучение в результате процессов взаимодействия, включающих рассеяние и / или поглощение. Различия в поглощении затем записываются на пленку (пленки) или с помощью электронных средств. В промышленной рентгенографии существует несколько доступных методов визуализации, методов отображения конечного изображения: пленочная рентгенография, рентгенография в реальном времени (RTR),

компьютерная томография (СТ), цифровая рентгенография (DR) и компьютерная рентгенография (CR).

Рентгеновская томография (RT) основана на разности прохождения рентгеновских лучей через различные среды, имеющих разную плотность и толщину. Участки с дефектами или различиями в плотности поглощают излучение неравномерно, тогда как области без дефектов пропускают рентген равномерно. Прохождение рентгеновского излучения регистрируется с помощью датчиков изображения. Данная технология характеризуется высокой надежностью и простотой интерпретации результатов. Для промышленного использования доступны два различных радиоактивных источника: рентгеновское и гамма-излучение. В этих источниках излучения используются версии электромагнитных волн с более высоким уровнем энергии, то есть с более короткой длиной волны. Основным ограничением этого метода неразрушающего контроля является необходимость соответствия угла измерения направлению излучения, поскольку эффективность обнаружения дефектов в вертикальном направлении оказывается низкой. В связи с этим во многих исследованиях RT сравнивается с другими методами неразрушающего контроля [49-51]. Кроме того, из-за радиоактивности используемых источников просвечивания изделий, этот метод требует определенных мероприятий, обеспечивающих строгое соблюдение стандартизированных правил техники безопасности во время эксплуатации источников излучения.

1.2.4 Способ обнаружения электромагнитного излучения

Процесс деформации и разрушения различных твердых материалов сопровождается электромагнитным излучением. В 1926 г. Иоффе и Цехновитцер обнаружили возрастание ионной проводимости в NaCl под действием пластической деформации. Однако более детально это явление было изучено в 1928 г. Дьюлаи и Хартли, в связи с чем в настоящее время возрастание ионной проводимости при деформации часто называют эффектом Дьюлаи — Хартли. Вслед за

Дьюлаи и Хартли изменение проводимости при пластической деформации наблюдал А.В. Степанов. Дьюлаи и Хартли ставили своей целью изучение механизма проводимости ионных кристаллов. Степанов, наоборот, использовал явление возрастания проводимости для изучения механизма пластической деформации. Это явление Степанов обнаружил в 1933 году при наблюдении за процессом нагружения кристаллов KCl. Эти исследования и описания электрических эффектов, связанных с пластической деформацией ионных кристаллов, хорошо описаны в работе А.А. Урусовской [53]. Впоследствии многочисленные исследования были посвящены изучению электромагнитного излучения в ионных кристаллах [54], металлах [55, 56], полимерах [57, 58], диэлектрических материалах [9, 10, 59] и горных породах [60-66]. Для регистрации электромагнитных сигналов, генерируемых в процессе деформации и разрушения материала, обычно используются электромагнитные антенны, индукционные или емкостные датчики, которые собирают и передают полученные данные для последующего мониторинга и анализа. Многие исследования сосредоточены на временных и частотных характеристиках электромагнитных сигналов. При различных методах нагружения, таких как одноосное сжатие, ударное трение и ползучесть, наблюдаются определенные различия в количестве электромагнитных импульсов и частоте сигналов [67, 68].

Первоначально особое направление исследований электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) проводилось при развитии разрушения горных пород с целью создания метода контроля и прогноза геодинамических проявлений в шахтах в виде сейсмических толчков и горных ударов, а также в зонах Земли с повышенной сейсмичностью [60-63]. Большую работу в этом направлении под руководством А.А. Воробьева провели сотрудники Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического института (в дальнейшем университета) (ПНИЛ ЭДИП ТПУ). Кроме того, большой вклад в разработку этой темы сделали сотрудники Института горного дела СО РАН, Института Физики земли РАН, Новосибирского технического университета, научно -

исследовательского Института горной геомеханики и маркшейдерского дела (Санкт-Петербург), Института горного дела УрО РАН, Заводской лаборатории г. Апатиты, Японии, Китая, Греции, Чехии, Грузии, США.

В 1955 году Воларович и Пархоменко [69] объясняли электромагнитное излучение при нагружении одноосным сжатием образцов гранита, гнейса и пустой породы проявлением пьезоэлектричества. В последствии ученые России и других стран предложили различные физические механизмы для объяснения генерации электромагнитного излучения в зависимости от свойств материалов, однако до сих пор не существует единой теории, которая могла бы охватить все случаи. Поскольку электромагнитное излучение зависит от множества факторов, объяснение этого явления с различными характеристиками с помощью одного механизма затруднено. Вероятно, это результат комбинированного действия нескольких механизмов, включая механизмы, основанные на механических напряжениях [68, 70-76], на механизмах заряжения дефектов и создания двойных электрических слоев, включая возникновение и распространение трещин, а также с трибоэлектричеством [77] с последующим вынужденным колебанием этих электрических слоев акустическими, электрическими или магнитными воздействиями [78-80]. В работе [81] показана связь пьезо- и трибоэлектрических эффектов, а в работе [82] зарядку поверхностей разрушения связывают с фрикционным скольжением бортов трещин.

Технология электромагнитного излучения широко применяется в качестве метода бесконтактного геофизического мониторинга в реальном времени для оценки устойчивости горных массивов, анализа напряженного состояния, мониторинга динамики горных пород и раннего предупреждения стихийных бедствий.

1.3 Метод неразрушающего контроля, основанный на акустико-электрических преобразованиях

Другим направлением применения электромагнитной эмиссии твердотельных материалов является неразрушающий контроль дефектности и критичности состояния материалов и изделий в процессе их эксплуатации. Широкое распространение получили исследования возбуждения электромагнитных сигналов при внешнем акустическом воздействии (акустико-электрические преобразования). Акустико-электрическим преобразованием (АЭП) связано преобразованием энергии упругих волн в энергию электромагнитного отклика. Существенный вклад в разработку неразрушающего контроля на основе АЭП внесли сотрудники ПНИЛ ЭДиП НИ ТПУ: Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Фурса Т.В., Данн Д.Д., Беспалько А.А., Яворович Л.В. и другие. Исследования в этом направлении проводились как на модельных образцах горных пород, так и на образцах из цементно-песчаной смеси (ЦПС) с дефектами из различных материалов.

В работах [83-86] выявлено, что при воздействии упругим акустическим импульсом на диэлектрическую структуру в ней формируется ЭМС, которые являются следствием колебательных движений двойных электрических слоев и флуктуационно-заряженных берегов микротрещин, освобождением и колебанием заряженных дислокаций, в том числе и в сегнетоэлектриках. В результате таких электромагнитных колебаний возможно осуществлять дефектоскопию диэлектрических твердотельных структур с дефектами разного типа, включая газообразные пустоты, жидкостные или твердотельные дефекты, а также обнаружения трещин на разных стадиях их развития. При внешнем акустическом воздействии параметры ЭМС будут определяться амплитудно-частотным спектром акустического импульса. При воздействии внутри материала акустическими импульсами, возникающими в процессе разрушения и росте трещин, происходит последовательность электромагнитных сигналов или электромагнитная эмиссия (ЭМЭ), параметры которой связаны с динамикой трещин. Авторы работ [83-86] 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 (АИ), диэлектрических свойств твердотельных материалов и зарядового состояния имеющихся дефектов, в том числе в виде включений, полостей и трещин. При наложении электрического поля при контроле диэлектрических дефектов [78, 79] или магнитного поля при контроле намагничивающихся дефектов [78, 80], происходит поляризация диэлектрических включений в зависимости от диэлектрической проницаемости или переориентация магнитных диполей намагничивающихся включений вдоль магнитных линий. Внешнее акустическое воздействие приводит к колебанию ориентированных диполей и, соответственно, к возбуждению ЭМС с повышенной или пониженной амплитудой.

Упрощенно, акустико-электрический эффект заключается в том, что при распространении упругих волн в среде двойной электрический слой (ДЭС), образованный контактами сред с различными проводящими, полупроводниковыми и диэлектрическими свойствами, а также заряженные борты трещин, возникающие при развитии разрушения, смещаются под действием акустического возбуждения. В результате таких колебаний ДЭС создается переменное или импульсное электромагнитное поле, что приводит к генерации электромагнитных сигналов с определенными амплитудно-частотными параметрами [78,87]. Амплитуда импульсов при акустико-электрических преобразованиях существенно возрастает в присутствии в средах сегнетоэлектрических материалов [88].

Расчеты, приведенные в работе [78], показали, что в результате АЭП происходит переизлучение на двойных электрических слоях энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. В этой работе показано, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной

связи как с характеристиками детерминированных акустических воздействий, так и с зарядовым состоянием слоистых и дефектных структур. Установлено также, что амплитуды ЭМС линейно зависят от величины заряда на обкладках дефекта, также как и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта. Авторы работы [87] экспериментально подтвердили генерации ЭМС двойными электрическими слоями. Они установили связь параметров внешних возбуждающих АИ и электромагнитных откликов модельных двойных электрических слоев. Система двойных слоев моделировалась набором покровных стекол с наклеенной алюминиевой фольгой, залитых дистиллированной водой. Эту модельную систему ДЭС сжимали и приводили в колебание с помощью стандартных пьезоэлектрических датчиков в диапазоне частот 60—150 кГц. При прохождении акустических импульсов регистрировали ЭМС в интервале 1—100 кГц с различными максимумами. В работе [89] авторы провели эксперименты на полосчатом образце серпентинита (горная порода) по выявлению влияния ДЭС при акустико-электрических преобразованиях. Последовательное уменьшение в образце количества контактов серпентина и хризотил-асбеста привело к экспоненциальному снижению амплитуды электромагнитного отклика на одинаковое внешнее импульсное акустическое воздействие. Экспериментальные и теоретические данные, приведенные в работах [85-89], экспериментально доказывают наличие эффекта генерации ЭМС при прохождении детерминированной акустической волны через среду, в которой имеются ДЭС. Наличие дефектов в виде газовых включений, водных растворов солей, диэлектриков, полупроводников и металлов в диэлектрических материалах и композитных структурах также образуют двойные электрические слои, которые являются источниками ЭМС при внешнем импульсном акустическом воздействии на них. Электромагнитные сигналы, генерируемые при акустико-электрических преобразованиях, несут информацию о характерных свойствах дефектов, а также о минерализации водных растворов [71, 90-94]. В статье [95] показано, что электромагнитные сигналы эффективно генерируются в пористом материале, в которых

содержится жидкость. В таких средах энергия упругих колебаний перераспределяется на границах включений. Возникающий там фильтрационный поток приводит в случае полярных жидкостей к смещению электрических двойных слоев на границах пор и, как следствие, к генерации электромагнитного поля.

Авторы статьи [96] исследовали технологию одновременного измерения параметров акустических и электромагнитных сигналов в модельной скважине, заполненной водным раствором с различной соленостью. Результаты исследований показали, что электромагнитный импульс индуцируется акустическим импульсом возбуждения при его распространении вдоль скважины. Дальнейшее изучение этой технологии будет способствовать применению акустико-электрических преобразований в каротаже скважин.

Как уже отмечалось, в случае диэлектрических материалов [95], электромагнитное поле, генерируемое при рассеянии звуковых волн на пористых упругих включениях в проводящей жидкости, определяется путем решения системы уравнений для рассеяния на сферических включениях. В статье [93] авторы предложили метод количественной оценки содержания флюидов в нефти или воде, основанный на изменениях электромагнитных сигналов при контакте флюида с горной породой. Используя форму спектра амплитудно-частотной характеристики ЭМС при детерминированном акустическом возбуждении, можно определить появление новых трещин в процессе разрушения образца под различными объемными нагрузками [9]. В условиях давления и механической нагрузки метод комбинированного механико-электрического и акустико-электрического преобразования можно успешно использовать для изучения процессов зарождения и развития трещин в твердых диэлектрических материалах и изделиях.

Выводы по главе 1

Поскольку общей целью диссертационной работы является разработка метода неразрушающего контроля для обнаружения дефектов в твердотельных диэлектрических материалах, поэтому метод обнаружения, специально используемый для проводящих материалов и ферромагнетиков, не рассматривается. Кроме того, из-за высокой проникаемости рентгеновского излучения и его опасного воздействия на здоровье человека рентгеновские методы, используемые для неразрушающего контроля качества объектов, исключаются из рассмотрения. Среди наиболее распространенных методов контроля неметаллических материалов перспективными являются ультразвуковые методы, методы акустической и электромагнитной эмиссии, а также методы использующие акустико-электрического преобразования. Методы ультразвуковой детекции были полностью исследованы и широко используются, но у них есть свои недостатки: они очень чувствительны к качеству поверхности и поверхностному контакту между приемником и исследуемым объектом, что требует очень строгих требований к техническим характеристикам образцов. Установка и расположение датчиков являются основными факторами, влияющими на ослабление и искажение зондирующего и принимаемого датчиком сигнала в данной технологии. Существуют также трудности при использовании методов ультразвуковой дефектоскопии для контроля изделий сложной формы и небольших размеров.

Методы акустической и электромагнитной эмиссии по существу являются пассивными методами контроля. Метод акустической эмиссии также очень чувствителен к контакту с поверхностью. На чувствительность акустической эмиссии легко влияют характеристики материала обнаруживаемого объекта. Например, гетерогенные материалы и материалы со сложной структурой будут генерировать сигналы, отличающиеся от обычного акустического сигнала, что затруднит обнаружение внутренних дефектов в материале. При использовании методов электромагнитного излучения основным недостатком является высокий уровень помех,

создаваемых внешними радиосигналами. Необходимо экранировать или создать условия, увеличивающие амплитуду принимаемого сигнала, например, за счет поляризации на границе дефекта. В принципе, увеличить амплитуду сигнала методами акустической эмиссии невозможно. Метод акустоэлектрического преобразования позволяет обойти некоторые ограничения, присущие другим методам неразрушающего контроля. Акустическое возбуждение образца создает упругую деформированную механическую волну, которая распространяется вперед в виде полусферической плоской волны и отражается от границы внутренних дефектов (небольших локальных дефектов, пьезоэлектрических включений и т.д.), что приводит к рассеянию части энергии. Энергия рассеивается в виде слабого электромагнитного излучения, и ее параметры могут быть записаны бесконтактно, что устраняет ограничения, связанные с поверхностью образца.

Также путем ударного воздействия шариком или стержнем электромагнитного устройства можно без особых искажений вводить в контролируемый материал или изделие детерминированный акустический импульс зондирования. По мере увеличения амплитуды передаваемого акустического сигнала увеличивается и амплитуда принимаемого электромагнитного сигнала. В этом случае, измеряя постоянную геометрию системы и образца, можно получить стабильный ответный сигнал, который позволяет отфильтровать стационарную составляющую шума. Например, вначале при ударе по контролируемому образцу шариком, имеющего заданную скорость в дефектном образце возбуждается детерминированный акустический импульс с определенной амплитудой, формой и длительностью. Акустический импульс взаимодействует с дефектами, с имеющимися или зарождающимися трещинами и в процессе акустико-электрических преобразований на двойных электрических слоях, образованных основным материалом образца и материалом дефекта, генерирует электромагнитный импульс. Использование более оптимизированного оборудования позволяет использовать метод акустического и электрического преобразования для контроля напряженно-

деформированного состояния неметаллических изделий, оценки общих дефектов образца и определения местоположения скопления дефектов. Однако увеличение мощности принимаемого сигнала и развитие методов фильтрации показывают, что метод акустико-электрического преобразования также может быть использован для поиска и характеристики отдельных дефектов.

При знакомстве с литературой по механизмам возникновения механико- и акустико-электрических преобразований остаются открытыми вопросы, по которым будут проведены определенные теоретические и экспериментальные исследования. Результаты этих исследований будут представлены в последующих главах диссертации.

К этим вопросам относятся:

1. Трехмерное позиционирование внутренних объемных дефектов в твердотельных образцах на основе акустико-электрических преобразований. Моделирование можно проводить численно и, для сравнения с расчетными данными, на реальных дефектных образцах из цементно-песчаной смеси.
2. Выявить особенности акустико-электрических методов мониторинга разрушения твердотельных диэлектриков при комбинированном нагружении сжатием и применением внешнего зондирования детерминированным акустическим импульсом на разных этапах подготовки этого разрушения.
3. Определение влияния контакта твердотельных образцов с солевыми растворами разной концентрации. Моделирование такого влияния также можно проводить на реальных дефектных образцах из цементно-песчаной смеси. Эти исследования важны для нефтедобывающей промышленности, для определения концентрации солей в водных источниках курортов, а также для определения степени солености питьевой воды.
4. Экспериментально показать возможность применения водных растворов солей для определения дефектности материалов и изделий на примере дефектных образцов из цементно-песчаной смеси.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

В главе 2 представлены исследуемые материалы и их свойства, используемые устройства и методики для контроля развития разрушения и дефектности образцов, современные методы обработки электромагнитных сигналов, необходимые для решения поставленных задач.

2.1 Измерение параметров акустических и электромагнитных сигналов в экспериментальных исследованиях

В экспериментах с твердотельными диэлектрическими материалами, проводимых с целями определения их электромагнитной активности при внешнем детерминированном акустическом возбуждении (АИ) и разработки неразрушающего метода контроля дефектности таких материалов, использовалась установка, блок-схема которой схематично отображена на рисунке 2.1а. Измерительный комплекс для импульсного детерминированного акустического возбуждения электромагнитных сигналов включал следующие основные компоненты: систему динамического возбуждения (СДВ) для генерации акустических импульсов в исследуемом образце (5, 6, 10, 11, 12); электромагнитный приёмник с электродами (3), выполненный по дифференциальной схеме (4), для регистрации электромагнитного сигнала, возникающего в образце в процессе акустико-электрических преобразований (ЭМС); пьезоэлектрический датчик (13) для приема и контроля акустического импульса возбуждения, прошедшего через образец и служащий также для запуска системы регистрации и для нормирования амплитуды ЭМС; источник питания усилителя сигналов ЭМС (9); плату ввода-вывода NI BNC 2120 (7) обеспечивающую прием отметок от оптопар и ЭМС и их передачу на компьютер для дальнейшего их анализа и расчетов.

На всех используемых в экспериментах стендах импульсное акустическое воздействие, вводимое в образец, создавалось ударом стального шарика. Диаметр шариков можно было

изменять от 2 до 5.5 мм. Амплитуда акустического возбуждения регулировалась сжатием пружинного устройства (11, 12). При этом длительность акустического воздействия на уровне 0.1 составляла $50 \cdot 10^{-6}$ секунд, а его форма была близка к нормальному распределению или к распределению Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.1)$$

где $f(x)$ – функция распределения, μ и σ – параметры нормального распределения: μ – соответствует среднему и наиболее вероятному значению x , а σ – среднеквадратичному отклонению.

При непосредственном ударе стальным шариком об образец происходит его зарядка в соответствие с исследованиями авторов [77]. Этот заряд создает существенную электромагнитную помеху и искажает параметры реального электромагнитного отклика на акустическое воздействие. В связи с этим, между шариком и образцом размещали заземленную закаленную стальную пластину, обладающую твердостью, близкую к твердости материала шарика. Энергия акустического импульса, вводимого в образец, определялась скоростями удара и отскока шарика от этой пластины, находящейся в акустическом контакте с исследуемым образцом. Скорости шарика измерялась с помощью блока динамической системы возбуждения СДВ, состоящей из двух оптических пар (5), размещенных на фиксированном расстоянии друг от друга равным 5 см. Расстояние до ближайшей к образцу оптопары равно 7 см. На мониторе компьютера (8) регистрировались по две отметки, возникавшие при прохождении шариком оптической системы в процессе его налета и отскоке от пластины, что позволяло определить его скорость и энергию акустического импульса, вводимого в образец без учета потерь в заземленной пластине [10]. Поскольку время пролета шарика до удара составляло $(t_{n1}-t_{n2})$, а при отскоке шарика время пролета определяется как $(t_{n4}-t_{n3})$, то при расстоянии между центрами оптических пар L в обоих случаях можно однозначно вычислить скорости шарика.

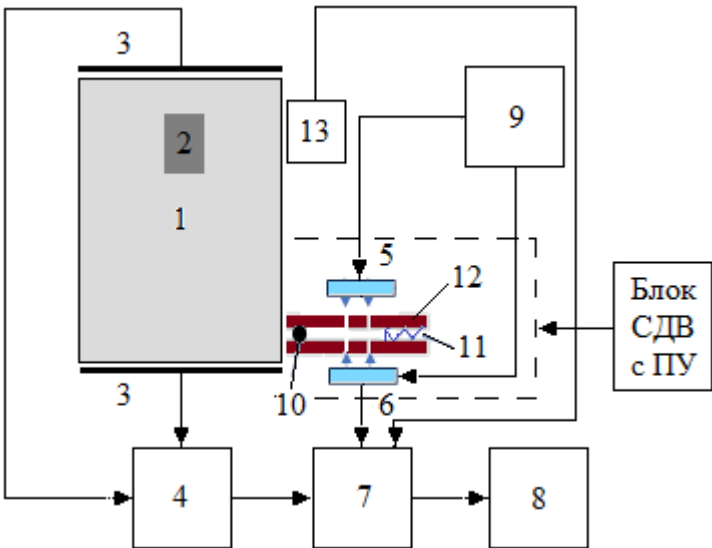


Рисунок 2.1 – Структурная схема лабораторного комплекса для регистрации электромагнитного отклика дефектных материалов при воздействии детерминированного акустического возбуждения: 1 – образец с внутренним дефектом; 2- дефект; 3 – измерительный и компенсирующий электроды; 4 – дифференциальный усилитель электромагнитных сигналов; 5 – излучающие светодиоды; 6 – приемные светодиоды; 7 – плата ввода-вывода данных; 8 – компьютер; 9 – блок питания; 10 – стальной шарик; 11 – пружина; 12 – металлическая трубка; 13 – пьезоэлектрический датчик.

Измерение скоростей производили не менее 10 раз и в дальнейшем усредняли. Погрешность измерения составила 3% для налетающего шарика и 15% при отскоке шарика. Используя приближение упругого соударения шарика о заземленную металлическую пластинку, без учета потерь энергии акустического импульса в ней, вычисленные скорости и массу шарика (m), вычисляли энергию акустического воздействия, передаваемую образцу, как

$$E_{exc} = \frac{m}{2} (V_i^2 - V_b^2) \quad (2.2)$$

где E_{exc} - энергия, вводимая в образец при ударе шариком; m – средняя масса шарика 86×10^{-3} кг, которая измерялась с точностью 10^{-5} кг; V_i - скорость налета шарика на мишень при ударе; V_b - скорость отскока шарика от мишени. Начальную скорость налета шарика изменяли путем устройства, обеспечивающего сжатие или ослабление пружины. Остаточная энергия удара,

вводимая в образец после отскока шарика, составляла $(5...30) \times 10^{-3}$ Дж. На этом же стенде производили измерения продольной скорости звука в исследуемых материалах.

Для исследования развития разрушения образцов при одноосном сжатии, в том числе при внешних акустических воздействиях в условиях ступенчатого нагружения, использовался стенд, схема которого представлена на рисунке 2.2а. На рисунке 2.2б показана конструкция специальных опор, создающих напряжение сдвига при одноосном сжатии. Диаметр выступа нижней опоры (11) на $4 \cdot 10^{-3}$ м меньше диаметра отверстия верхней опоры (12). Кроме того, опоры 11 и 12 обеспечивают центрирование образца, что гарантирует совпадение осей выступа и отверстия. В результате использования таких опор наблюдали в образцах сдвиговое разрушение. Для образцов с квадратным сечением необходимо применять соответствующие этому сечению опоры.

Емкостной электромагнитный датчик ЭМД (4) представляет собой дифференциальный усилитель. В емкостном датчике использованы малошумящие дифференциальные усилители АД8627 (ДУ). На входе датчика ДУ собраны с обратной связью как усилители тока для обеспечения согласования высокого сопротивления принимающих пластин (Э) и входного сопротивления усилителя. Кроме того, в емкостном датчике имеются фильтры нижних (ФНЧ) и верхних частот (ФВЧ), которые обеспечивали его работу в диапазоне от 1 до 100 кГц. На выходе емкостного датчика сигнал усиливался с коэффициентом 10 или 100. При измерениях коэффициент усиления выбирался в зависимости от амплитуды входного ЭМС. Чувствительность ЭМД по входу - 5×10^{-4} В.

В ходе экспериментов расстояние от поверхности исследуемых образцов до ближайшей пластины электромагнитного датчика устанавливалось в пределах $(1-5) \times 10^{-3}$ м. Для образца из цементно-песчаной смеси это расстояние составляло $(1-2) \times 10^{-3}$ м. При необходимости электромагнитный датчик можно перемещать вдоль центральной оси образцов последовательно по измерительным площадкам и обратно в соответствие с планом исследований. При этом первоначально установленное расстояние между принимающей пластиной электромагнитного

датчика и поверхностью образца с помощью лимбов оптического столика и контрольной пластиной заданной толщины постоянно выдерживалось в процессе проведения измерений ЭМС.

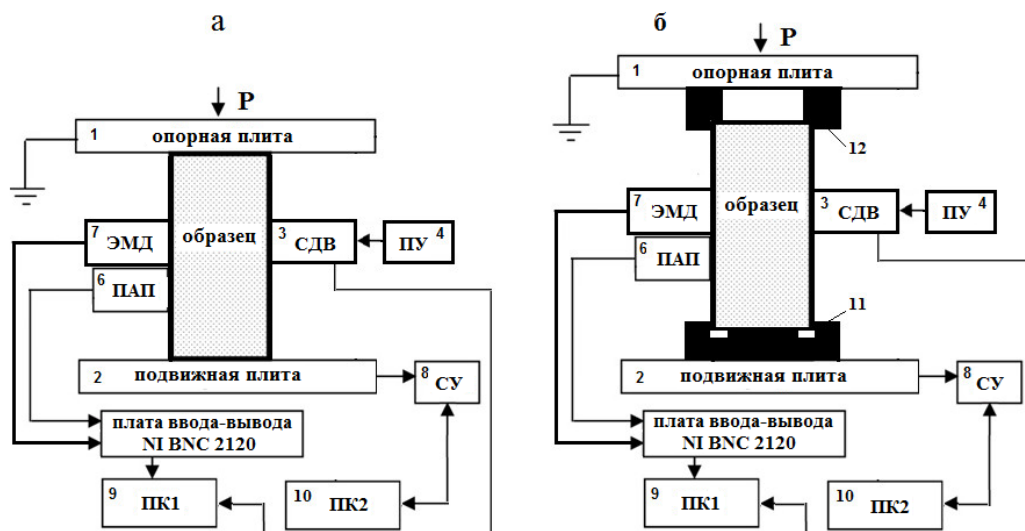


Рисунок 2.2 – Стенд для контроля развития этапов разрушения в диэлектрических образцах при их возбуждения внешними детерминированными акустическими импульсами и измерении параметров электромагнитных откликов на такое возбуждение в процессе постоянного и ступенчатого сжатия (а); стенд для контроля развития этапов разрушения диэлектрических образцов при сдвиге, в том числе при ступенчатом нагружении и измерения параметров ЭМС при внешнем акустическом воздействии (б): опорная плита прессы ИП500.1; 2) подвижная плита прессы ИП500.1; 3) динамическая система возбуждения для управления энергией удара шарика СДВ; 4) пружинное устройство ПУ СДВ для разгона шарика с целью создания в образце детерминированного акустического импульса; 5) многофункциональная плата ввода-вывода NI BNC 2120; 6) пьезоэлектрический приемник акустических импульсов ПАП; 7) электромагнитный дифференциально-емкостной датчик ЭМД; 8) система управления прессом с сервоклапаном СУ; 9) персональный компьютер ПК1 для визуализации и амплитудно-частотного анализа акустических и электромагнитных сигналов; 10) персональный компьютер ПК2 для ввода заданий в сервопривод прессы и вывода данных о приложенных напряжениях и деформации образца.

В дальнейшем с помощью специально разработанных программ ЭМС нормировался по созданному ударом шарика возмущению и производился его спектральный анализ с помощью программы быстрого преобразования Фурье (БПФ). В соответствии с поставленными задачами, для определения концентрации солевых растворов исследовались электромагнитные сигналы

контактов этих солевых растворов и образцами затвердевшей цементно-песчаной смеси (ЦПС) с размерами $(50 \times 50 \times 100)$ мм³. Такие контакты образуют двойные электрические слои [97-99]. В экспериментах использовались также образцы ЦПС с модельными твердотельными дефектами в них. В качестве дефектов применяли материалы с удельными плотностями, существенно отличающимися от плотности вмещающего образца ЦПС. Параметры используемых в работе твердотельных материалов представлены в таблице 2.1.

В экспериментах применяли водные растворы солей $NaCl$, NaI и $CaCl_2$, молекулы которых имеют разные молярные массы 58.5 г/моль, 150 г/моль и 111 г/моль, соответственно. Соли $NaCl$ и NaI отличаются анионами, имеющими большую разницу их молярных масс, а в солях $NaCl$ и $CaCl_2$ уже катионы существенно отличаются молярную массу. Использовались водные растворы этих солей разной концентрации.

Таблица 2.1. Акустические и электрические параметры материалов образцов [100]

№ п.п	Материал образцов	Удельная плотность материала, ρ_v , кг/м ³	Скорость продольного звука, c_l , м/с	Акустический импеданс, z , 10^6 кг/с $\times$ м ²	Удельное электрическое сопротивление, $\rho_{эс}$, Ом $\times$ м
1	Цементно- песчаный камень (ЦПС)	1900	2765	5,25	$38,4 \times 10^3$
2	Оргстекло (ПММА)	1200	2700	3,24	$10^{13} - 10^{14}$
3	Сталь углеродистая	7800	5890	45,94	$1,3 \cdot 10^{-5}$

При проведении экспериментальных исследований применяли, как и в выше приведенных методиках, метод акустико-электрических преобразований (АЭП), заключающийся в бесконтактной регистрации параметров электромагнитных сигналов при внешнем ударном

детерминированном импульсном акустическом возбуждении. Использовались также методы весового контроля и определения проводимости солевых растворов.

На рисунке 2.3а схематически показан образец и его расположение в емкости с водным раствором солей. Возбуждение акустическим импульсом можно было производить по большей или меньшей поверхности образца. На рисунке 2.3а выделены площадки S_i для последовательной регистрации ЭМО. На рисунке 2.3б приведена блок-схема экспериментальной установки для возбуждения детерминированными акустическими импульсами (АИ) электромагнитных сигналов от контакта материала образца с солевым раствором [99]. Все операции возбуждения детерминированного АИ, измерения ЭМС и обработки результатов их измерения аналогичны методике, блок-схема которой приведена на рисунке 2.1.

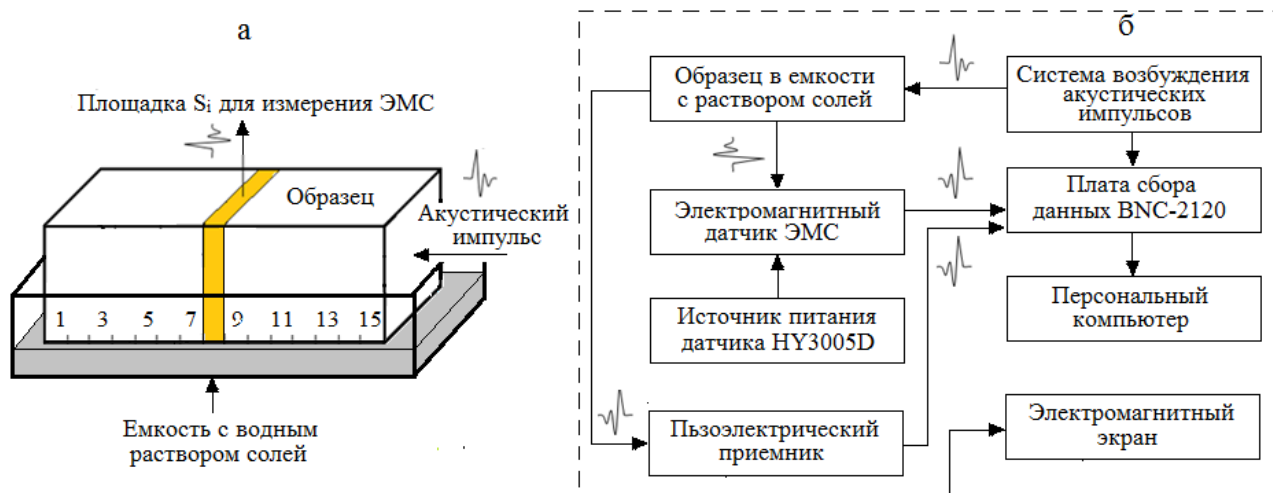


Рисунок 2.3 – Образец с емкостью водных растворов солей (а); блок-схема экспериментальной установки для акустического возбуждения электромагнитных сигналов и их регистрации из образцов, находящихся в контакте с растворами солей (б)

Под рисунком 2.1 приведены комментарии по использованию этой методики. Для измерения проводимости солевых растворов использовали стандартный анализатор жидкости «Анион 7053».

2.2 Методы обработки сигналов

В данной работе предложен новый алгоритм устранения шумов из регистрируемых электромагнитных или акустических сигналов. Улучшена методика полного ансамблевого эмпирического разложения мод с адаптивным шумом в сочетании с вейвлет-преобразованием (Complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise +Wavelet, CEEMDAN + Wavelet), где коэффициент ранговой корреляции Спирмена (Spearman) применяется для эффективного отбора собственных модовых функций с целью устранения шума при сохранении характерных особенностей сигнала из зоны разрушения нагруженных внешним сжатием или сдвигом, в нашем случае, диэлектрических материалов или горных пород. Суть ранговой корреляции Спирмена заключается в переходе от абсолютных значений признаков к их рангам – порядковым номерам в упорядоченном ряду. Значения каждого признака ранжируются отдельно, затем рассчитывается корреляция между полученными рангами. Знак коэффициента корреляции Спирмена указывает на направление взаимосвязи между X (независимой переменной) и Y (зависимой переменной). Если Y имеет тенденцию увеличиваться при увеличении X , то коэффициент корреляции Спирмена будет положительным. Если Y имеет тенденцию уменьшаться при увеличении X , то коэффициент корреляции Спирмена будет отрицательным. Коэффициент корреляции Спирмена, равный нулю, указывает на то, что Y не имеет тенденции ни к увеличению, ни к уменьшению при увеличении X . Коэффициент корреляции Спирмена увеличивается по мере того, как X и Y становятся все более похожими на идеально монотонные функции друг друга. Когда X и Y идеально монотонно связаны, коэффициент корреляции Спирмена становится равным 1 [101].

Метод CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise - комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом) - это усовершенствованный метод анализа нестационарных и нелинейных сигналов, основанный на эмпирическом разложении моды (Empirical Mode Decomposition, EMD). Он устраняет «эффект

перемешивания мод» и снижает остаточный шум, добавляя белый шум на каждом этапе разложения, что обеспечивает точную декомпозицию сигнала на составляющие (IMF) [102-105]. EMD осуществляет разложение сигнала на набор собственных модовых функций (intrinsic mode functions, IMF), которые затем подвергаются преобразованию Гильберта для получения мгновенной частоты. В результате нелинейный нестационарный временной ряд после преобразования Гильберта-Хуанга представляется в виде амплитудно-частотного спектра (спектра энергии).

Согласно концепции собственных модовых функций, для обеспечения физической значимости мгновенной частоты в любой точке функции должны выполняться два условия:

(а) сумма количества точек локальных экстремумов и нулевых пересечений на протяжении всего временного ряда должна быть равной либо отличаться не более чем на единицу;

(б) любой момент времени среднее значение между огибающей локальных максимумов и огибающей локальных минимумов должно равняться нулю.

Процесс эмпирической модовой декомпозиции представлен на рисунке 2.4. Сигнал $f(t)$ может быть выражен как сумма n -го порядка IMF-компонентов и остаточного члена $r(t)$, что математически описывается уравнением (2.3) как

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (2.3)$$

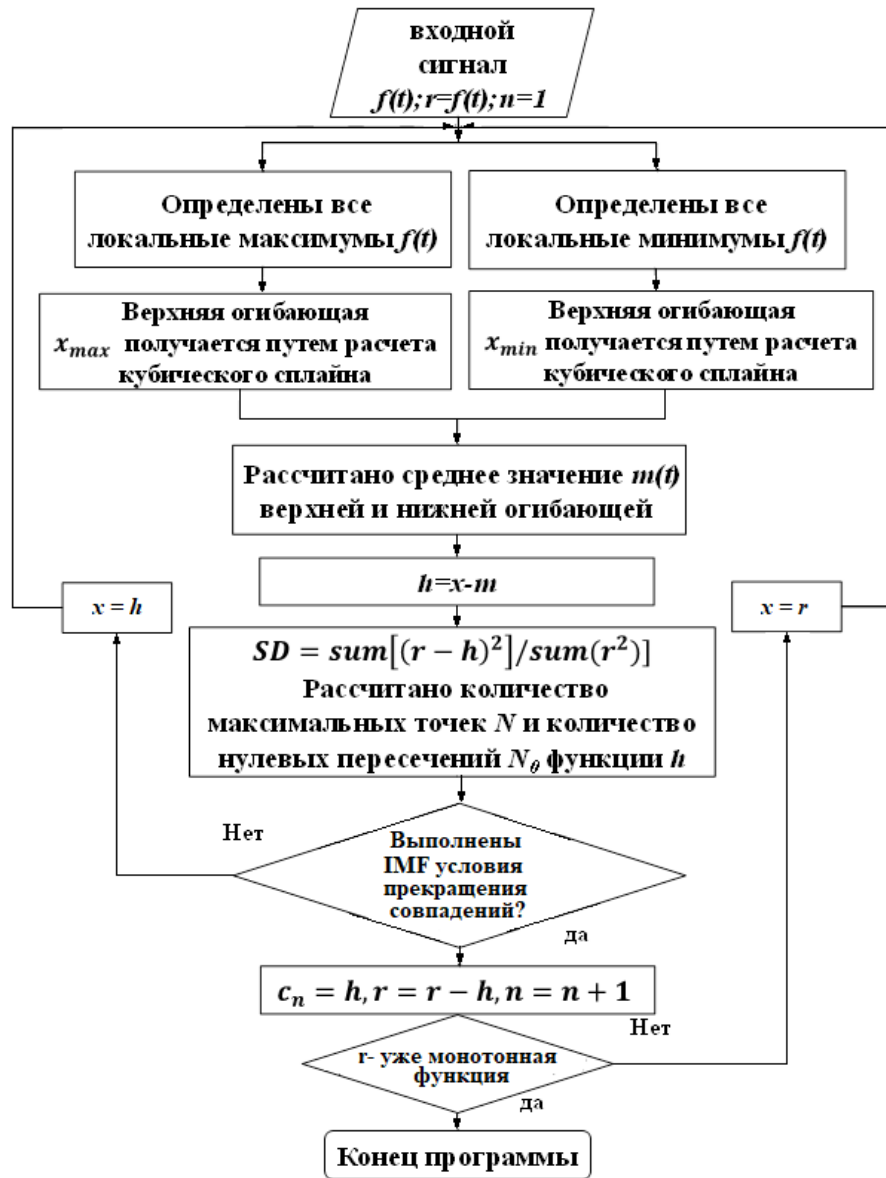


Рисунок 2.4 – Блок-схема процедуры расчета EMD

Полученные в результате декомпозиции IMF-компоненты удовлетворяют условиям преобразования Гильберта, что позволяет к каждому порядку IMF-компонентов применять преобразование Гильберта.

При использовании метода EMD возникает проблема граничных точек, которая заключается в следующем: верхняя и нижняя огибающие, построенные с помощью кубических сплайнов, демонстрируют расхождение в начале и конце временного ряда в процессе декомпозиции.

Это расхождение постепенно распространяется внутрь всего ряда по мере выделения IMF-

компонентов, что приводит к значительному искажению результатов. Для решения данной проблемы применяется метод зеркального продолжения сигнала (Mirror Extending method). Кроме того, сигнал разрушения горных пород, рассматриваемый в работе [104], характеризуется скачкообразными изменениями. Вследствие этого в процессе декомпозиции может происходить потеря временного масштаба, что приводит к неравномерному распределению экстремальных точек в сигнале и, как следствие, к нарушению процесса разложения — явлению, известному как модовая путаница (modal aliasing). В этом случае полученные IMF-компоненты не имеют физического смысла. Для устранения указанных недостатков в работе применяется метод CEEMDAN. Данный метод основан на принципе подавления шума, присутствующего в измеряемом сигнале, путем добавления белого шума, что позволяет минимизировать эффект модовой путаницы, характерный для EMD. Алгоритм метода включает следующие этапы:

Попарное добавление случайного шума к исходному сигналу в противоположных направлениях для формирования модифицированных сигналов $f1(t)$ и $f2(t)$.

Применение EMD к каждому из полученных сигналов $f1(t)$ и $f2(t)$.

Повторение шагов 1 и 2 до достижения заданного количества итераций.

Усреднение результатов, полученных на шаге 2, для окончательного выделения IMF-компонентов.

Таким образом, CEEMDAN позволяет значительно улучшить качество декомпозиции нестационарных сигналов со сложной структурой, таких как сигналы разрушения горных пород.

Поскольку сигнал является нелинейным, для анализа взаимосвязи между декомпозиционными IMF-компонентами и исходным сигналом применяются коэффициенты ранговой корреляции Спирмена. Данный коэффициент используется для селекции IMF, полученных в результате CEEMDAN-декомпозиции: компоненты с преобладанием шумовой составляющей отбрасываются, тогда как IMF с высокой степенью корреляции с исходным сигналом и значимой полезной составляющей сохраняются для дальнейшего анализа.

Математическое выражение коэффициента приведено в формуле (2.4):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2.4)$$

где d_i - обозначает разницу между i -й парой рангов, а n - размер выборки. Когда коэффициент корреляции $\rho \geq 0,4$ между компонентом IMF и измеренным сигналом, то для реконструкции сигнала выбираются компоненты IMF. Этот подход может эффективно отфильтровывать высокочастотные помехи, и, наконец, восстановленный сигнал фильтруется с помощью пороговой обработки вейвлетом. В данной главе в качестве исходного сигнала для моделирования используется эталонный ударный сигнал (уравнение 2.5), к которому добавляется контролируемый уровень белого шума. Параметры эксперимента: частота дискретизации: 1 МГц; уровень шума: гауссовский белый шум со стандартным отклонением $\sigma=2.5$. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.5.

Для количественной оценки эффективности обработки сигнала применены следующие метрики: отношение сигнал-шум (SNR, уравнение 2.6); среднеквадратическая ошибка (RMSE, уравнение 2.7).

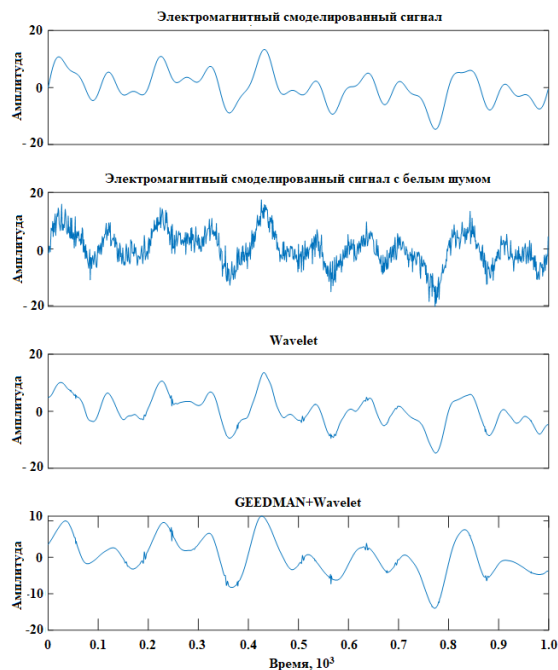


Рисунок 2.5 – Моделирование зашумленности электромагнитного сигнала белым шумом и его обработки Wavelet и GEEDMAN + Wavelet

$$f(t) = 5(1 + \cos(18000\pi t)) \sin(20000\pi t) + 4 \sin(10000\pi t) + 2 \sin(15000\pi t) \quad (2.5)$$

$$SNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{std}(\text{signal})}{\text{std}(\text{noise})} \right) \quad (2.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\hat{y}_i - y_i}{n}} \quad (2.7)$$

Анализ пяти наборов зашумленных данных электромагнитного излучения (таблица 2.2) демонстрирует преимущества комбинированного метода CEEMDAN+Wavelet:

- более эффективное подавление шумовой составляющей;
- минимизация искажений полезного сигнала;
- улучшенное сохранение характеристик исходного электромагнитного излучения.

Таблица 2.2 Сравнение эффективности различных методов шумоподавления

SNR			RMSE		
Исходный сигнал (EMR)	Wavelet	CEEDMAN+ Wavelet	Исходный сигнал (EMR)	Wavelet	CEEDMAN+ Wavelet
6.6701	8.8295	16.2739	2.4877	1.8013	0.8033
6.6047	9.5136	17.6659	2.5065	1.7739	0.7267
6.7783	9.1228	17.4489	2.4569	1.7996	0.7178
6.5991	8.9833	15.9022	2.5082	1.7822	0.8419
6.7540	9.0019	15.9166	2.4638	1.7864	0.8321

Выводы по главе 2

Таким образом, в главе 2 представлен:

- лабораторный комплекс для регистрации электромагнитного отклика дефектных материалов при воздействии детерминированного акустического возбуждения, используемый в экспериментальных исследованиях, в том числе для разработки методов трехмерного позиционирования дефектных твердотельных диэлектрических материалов (глава 3);

- показаны методики возбуждения ударом шарика внешнего акустического импульса, вводимого в тестируемый образец, а также измерения энергии акустического воздействия и измерения продольной скорости звука, возбуждаемого ударом шарика;

- рассмотрены методы контроля развития этапов разрушения в диэлектрических образцах в процессе постоянного и ступенчатого сжатия при их возбуждения внешними детерминированными акустическими импульсами и измерении параметров электромагнитных откликов на такое возбуждение;

- приведены акустические и диэлектрические параметры используемых в экспериментальных исследованиях материалов и их размеры;

- описана экспериментальная методика для акустического возбуждения электромагнитных сигналов и их регистрации из образцов, находящихся в контакте с растворами солей;

- приведены наименования, молярные массы, концентрации и свойства водных растворов солей, используемых в экспериментах для определения их влияния на параметры электромагнитных откликов при внешнем акустическом возбуждении;

- Рассмотрены и проанализированы метод обработки электромагнитных сигналов с использованием усовершенствованного метода CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise — комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом), а также применение ранговой корреляции Спирмена для отбора IMF.

- приведен анализ пяти наборов зашумленных данных электромагнитного излучения, который демонстрирует преимущества комбинированного метода CEEMDAN+Wavelet: более эффективное подавление шумовой составляющей; минимизация искажений полезного сигнала; улучшенное сохранение характеристик исходного электромагнитного излучения.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ТРЕХМЕРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Введение в акустоэлектрическое преобразование сигнала в физическом эксперименте и измерениях

В экспериментах по измерению акустоэлектрических сигналов на образец подается детерминированное акустическое возбуждение, а для регистрации возникающего электромагнитного сигнала используется дифференциальный электромагнитный приемник. В главе 2 на рисунке 2.1 представлена структурная схема динамического возбуждения и измерения параметров возбуждающих акустических импульсов и возникающих ЭМС, которые генерировались при колебании ДЭС на контактах материалов образца (1) и дефекта (2). Энергия возбуждения зондирующих акустических импульсов, определение их энергии, схемы регистрации электромагнитного отклика на такое возбуждение, измерение акустических импульсов, прошедших модельный образец и участвующих в запуске системы измерения, анализ параметров ЭМС и энергии внешнего акустического возбуждения для получения временных рядов информации об акустико-электрических преобразованиях (АЭП) в образцах с внутренними дефектам, представлены там же.

Теоретическое обоснование различных видов электризации диэлектрических и полупроводниковых материалов достаточно полно приведено в работах [106-107]. В главе 1 уже были описаны некоторые механизмы акустико-электрических преобразований на бортах возникающих трещин в процессе развития разрушения, так и при внешнем акустическом воздействии на материалы, включающие в себе двойные электрические слои [83-86]. Было однозначно показано, что при воздействии упругим акустическим импульсом на диэлектрическую структуру в ней формируется ЭМС, которые являются следствием колебательных движений двойных электрических слоев и флуктуационно-заряженных берегов

микротрещин, освобождением и колебанием заряженных дислокаций, в том числе и в сегнетоэлектриках. Возникающие электромагнитные колебания могут успешно использоваться для дефектоскопии диэлектрических твердотельных структур с дефектами разного типа, включая газообразные пустоты, жидкостные или твердотельные дефекты, а также обнаружения трещин на разных стадиях их развития. При воздействии акустическими импульсами, возникающими в процессе разрушения и росте трещин внутри материала, происходит генерация последовательности электромагнитных сигналов или электромагнитная эмиссия (ЭМЭ), параметры которой связаны с динамикой трещин. Авторы работ [83-86] 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 (АИ), диэлектрических свойств твердотельных материалов и зарядового состояния имеющихся дефектов, в том числе в виде включений, полостей и трещин. Упрощенно, акустико-электрический эффект заключается в том, что при распространении упругих волн в среде двойной электрический слой (ДЭС), образованный контактами сред с различными проводящими, полупроводниковыми и диэлектрическими свойствами, а также заряженные борты трещин, возникающие при развитии разрушения, смещаются под действием акустического возбуждения. В результате таких колебаний ДЭС создается переменное или импульсное электромагнитное поле, что приводит к генерации электромагнитных сигналов с определенными амплитудно-частотными параметрами [78,87]. Амплитуда импульсов при АЭП существенно возрастает в присутствии в средах сегнетоэлектрических материалов [88].

Кроме того, в работах [77, 108, 109] показана возможность и описания трибоэлектризации материалов при соударениях тел и трении. При взаимном трении, также как и при соударении,

электризация наблюдается у двух диэлектриков или полупроводников, а также металлов разных по химическому составу, но обладающих отличающимися механическими или электрическими свойствами. Электризуются оба материала с равными по величине зарядами, но с противоположными знаками. Такая же зарядка возможна для контактов жидкостных и воздушных включений в различных твердых телах.

Для целей обнаружения дефектности изделий с использованием АЭП процесс трибоэлектризации очень важен. Это обусловлено тем, что в процессе распространения возбуждающего акустического импульса по контролируемому объекту с дефектом на границе дефекта и вмещающего материала за счет разности акустических свойств происходят их трение с последующим смещением. Трение обуславливает зарядение контактов, а смещение заряженного контакта приводит к возникновению токов смещения и, как следствие, к генерации ЭМС.

3.1.1 Введение в преобразование акустико-электрического сигнала в численное моделирование

Для анализа влияния образующихся зарядов контактов дефекта и вмещающего материала при одинаковых значениях акустического возбуждения в разных местах контролируемого дефектного образца, а также при влиянии разных амплитуд внешних возбуждающих акустических импульсов при постоянном заряде контактирующих слоев, можно воспользоваться упрощенной моделью в виде конденсатора. Емкость такого конденсатора будет определяться как

$$C(I) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 M}{I + L} \quad (3.1)$$

Здесь I - представляет механическое смещение определенной точки дефекта, L - обозначает расстояние между двойными электрическими слоями, образованные заряженными слоями дефекта и вмещающего материала, а M - является площадью контакта, ε и ε_0 - диэлектрические постоянные материала при нормальных условиях и в вакууме, соответственно.

В этом случае уравнение для заряда представлено в виде

$$q(t) = C(I(t))u(t) \quad (3.2)$$

где t представляет время, акустоэлектрический сигнал $u(t)$ может быть получен с помощью уравнения (3.2). На примере сегнетоэлектрических материалов можно в процессе конечно-элементного моделирования заряд q , можно определить как $q=DF$ на основе пьезоэлектрического модуля D , свойственного сегнетоэлектрику при прямом пьезоэффекте, а также приложенной силы F . Таким образом, можно рассчитать сигнал АЭП в процессе моделирования.

3.1.2 Алгоритм определения времени прихода продольной акустической волны

Приход продольных акустических волн (Р-волн) играет важную роль в таких областях, как неразрушающий контроль, и позволяет вычислять местоположение внутренних дефектов с помощью алгоритмов позиционирования. Для извлечения времени прибытия продольной волны использовался метод краткосрочного усреднения/долгосрочного усреднения в сочетании (Short term average/long term average, STA/LTA) [110] с методом информационных критериев Акаике (Akaike information Criterion, AIC).

В основе метода STA/LTA лежит соотношение среднеквадратичных значений (RMS) сигналов, вычисленных в двух временных окнах: краткосрочном (short-term average, ST) и долгосрочном (long-term average, LT). Основные уравнения данного метода имеет следующий вид [111]:

$$LTA(m) = \frac{1}{long} \sum_{j=m}^{m+long} |A(j)| \quad (3.3)$$

$$STA(m) = \frac{1}{short} \sum_{j=m+long}^{m+long+short} |A(j)| \quad (3.4)$$

$$\frac{STA}{LTA}(m) = \frac{STA(m)}{LTA(m)} \geq \lambda \quad (3.5)$$

$$\frac{STA}{LTA}(m)^* = \frac{\exp\left[\frac{STA}{LTA}(m)\right]}{\sum\left[\frac{STA}{LTA}(m)\right]} \quad (3.6)$$

В уравнениях: m - представляет момент выборки; $long$ - соответствует длине долгосрочного временного окна; $short$ - определяет длину краткосрочного временного окна; $|A(j)|$ - обозначает абсолютное значение амплитуды сигнала в момент времени j ; λ - является пороговым значением для срабатывания.

Функция AIC (Akaike Information Criterion) выражается следующим образом:

$$AIC(k) = k \lg(\text{Var}(x[1, k])) + (l - k - 1) \lg(\text{var}(x[k + 1, l])) \quad (3.7)$$

В представленном выражении: x - обозначает дискретные данные волнового сигнала; k - определяет диапазон всех точек выборки в анализируемом временном окне.

Традиционный метод STA/LTA требует многократной корректировки порога срабатывания в уравнении (3.6). Для эффективного решения данной проблемы предлагается использовать преобразованные значения STA/LTA для вычисления критерия AIC, при этом локальный минимум полученной функции соответствует моменту прихода Р-волны. Уравнение (3.7) позволяет устранить колебательное затухание, вызванное геометрическим расширением STA/LTA-преобразования. Где $\exp$ — экспоненциальная функция, а $\sum$ — функция суммирования. Использование преобразованных значений STA/LTA для расчета AIC, а время, соответствующее полученному локальному минимуму, — это время прибытия Р-волны.

3.1.3. Алгоритм трехмерного (3D) позиционирования

Для расчетов воспользуемся моделью, в которой акустическое возбуждение ударом шарика по схеме, приведенной на рисунке 2.1, производится в различных точках контролируемого образца (рисунок 3.1) и обозначенные как S . Точки $S1-S8$ обозначают выбранные места ударов по образцу для возбуждения в нем детерминированных акустических импульсов. В трехмерной декартовой системе координат точка удара $S4$ (или $S8$) установлена как начало координат.

Остальные точки удара $S1$, $S2$ и $S3$ (или $S5$, $S6$ и $S7$), расположены на расстоянии d от $S4$ (или $S8$), образуя прямоугольную группу. Точка расположения дефекта P обозначается как (x_p, y_p, z_p) , а координаты точки удара обозначаются как (x_i, y_i, z_i) . Разница во времени распространения акустических волн от точек удара S_i и S_j до точки P обозначается как Δt_{ij} . Таким образом:

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad (3.8)$$

Угол между направлением от P к $S4$ и направлением S_i (совмещенным с осями координат) обозначается как θ_i . Здесь c - представляет собой скорость звука.

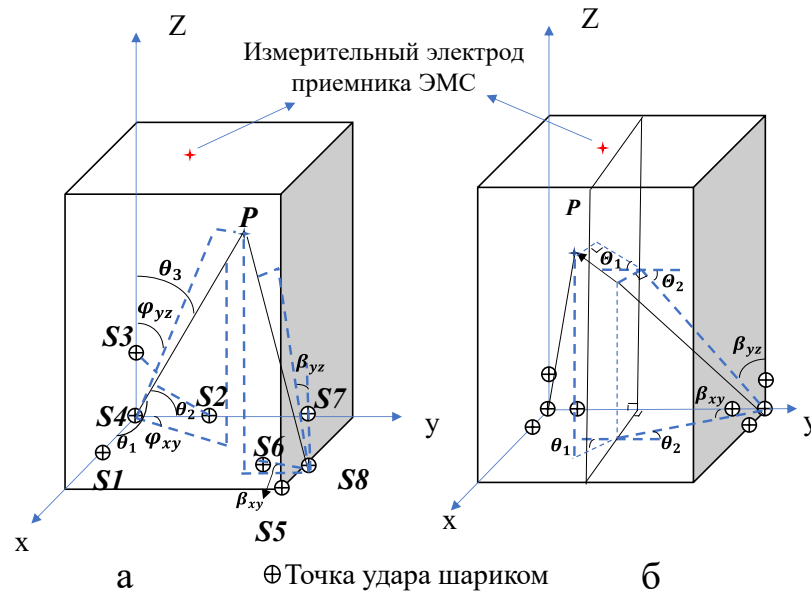


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема мест детерминированного акустического возбуждения модельного дефектного образца: а - однослойная трехмерная структура; б – двухслойная трехмерная структура.

Проекция точки P на плоскость xu образует угол φ_{xy} с осью y , а ее проекция на плоскость yz образует угол φ_{yz} с осью z . Расстояние d между точками возбуждения намного меньше расстояния от источника звука P до любой S_i . В диапазоне, образованном вершинами $S1$ - $S4$, сферическую волну можно приближенно рассматривать как плоскую волну. Следовательно,

$$\cos \theta_1 = \frac{\Delta t_{14} \cdot c}{d} \quad (3.9)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\Delta t_{24} \cdot c}{d} \quad (3.10)$$

$$\cos\theta_3 = \frac{\Delta t_{34} \cdot c}{d} \quad (3.11)$$

$$\cos\theta_1 = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_3\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{xy}\right) \quad (3.12)$$

$$\cos\theta_2 = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_3\right) \cdot \cos(\varphi_{xy}) \quad (3.13)$$

$$\tan\varphi_{xy} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = \frac{\Delta t_{14}}{\Delta t_{24}} \quad (3.14)$$

$$\tan\varphi_{yz} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = \frac{\Delta t_{24}}{\Delta t_{34}} \quad (3.15)$$

Прямую линию, на которой лежит точка Р, можно выразить как:

$$x_p = y_p \cdot \tan\varphi_{xy} \quad (3.16)$$

$$y_p = z_p \cdot \tan\varphi_{yz} \quad (3.17)$$

Аналогично, прогнозируемый угол pS_8 можно получить как:

$$\tan\beta_{xy} = \frac{\Delta t_{58}}{\Delta t_{68}} \quad (3.18)$$

$$\tan\beta_{yz} = \frac{\Delta t_{68}}{\Delta t_{78}} \quad (3.19)$$

Таким образом, образуются два линейных уравнения:

$$x_p - x_8 = (y_p - y_8) \cdot \tan\beta_{xy} \quad (3.20)$$

$$y_8 - y_p = (z_p - z_8) \cdot \tan\beta_{yz} \quad (3.21)$$

Местоположение дефекта получено из следующих уравнений:

$$x_p = \frac{y_8 \cdot \tan\varphi_{xy} \cdot \tan\beta_{xy} + x_8 \cdot \tan\varphi_{xy}}{\tan\beta_{xy} + \tan\varphi_{xy}} \quad (3.22)$$

$$y_p = \frac{y_8 \cdot \tan\beta_{xy} + x_8}{\tan\beta_{xy} + \tan\varphi_{xy}} \quad (3.23)$$

$$z_p = \frac{y_8 \cdot \tan\beta_{xy} + y_8}{\tan\varphi_{yz} \cdot (\tan\beta_{xy} + \tan\varphi_{xy})} \quad (3.24)$$

На рисунке 3.1 направление и скорость до преломления выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} \theta_2 + \beta_{yz} = \frac{\pi}{2} \\ \theta_2 = \beta_{xy} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{d}{\sqrt{\Delta t_{14}^2 + \Delta t_{24}^2 + \Delta t_{34}^2}} \\ C_2 = \frac{d}{\sqrt{\Delta t_{58}^2 + \Delta t_{68}^2 + \Delta t_{78}^2}} \end{cases} \quad (3.26)$$

Уравнение (3.26) можно вывести из уравнения (3.9-3.11) и формулы направляющего косинуса. Направление после преломления можно получить по закону Снеллиуса:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (3.27)$$

Поскольку граничная точка находится в $y_a \cdot \tan \beta_{xy}, y_a, y_a / \tan \varphi_{yz}$, то

$$\theta_1 = \arcsin \left[\frac{C_1 \cdot \sin \beta_{xy}}{C_2} \right] \quad (3.28)$$

а расчетные координаты точки дефекта определяются как:

$$x_p = \frac{y_a \cdot \tan \varphi_{xy} \cdot \tan \theta_1 + y_a \cdot \tan \beta_{xy} \cdot \tan \varphi_{xy}}{\tan \theta_1 + \tan \varphi_{xy}} \quad (3.29)$$

$$y_p = \frac{y_a \cdot \tan \theta_1 + y_a \cdot \tan \beta_{xy}}{\tan \theta_1 + \tan \varphi_{xy}} \quad (3.30)$$

$$z_p = \frac{y_a \cdot \tan \theta_1 + y_a \cdot \tan \beta_{xy}}{\tan \varphi_{yz} \cdot (\tan \theta_1 + \tan \varphi_{xy})} \quad (3.31)$$

В расчетах использовался метод, описанный в [110, 111]. Этот метод не требует предварительного знания свойств материалов и применим как к изотропным, так и к анизотропным материалам. Кроме того, он устраняет необходимость решения нелинейных уравнений, что позволяет быстро локализовать дефекты. Учитывая, что скорость электромагнитных волн в твердых материалах значительно выше, чем скорость звуковых волн, а время поляризации, необходимое для преобразования звуковых волн в электромагнитные, крайне мала и составляет около 10^{-10} секунды [106-108], то время прихода начала первого электромагнитного импульса, возникающего при акустоэлектрических преобразованиях, опережает акустический импульс на принимающих датчиках и может быть обозначено как t_i . Знание времени прихода ЭМС существенно облегчает определение местоположения дефекта.

TDOA (Time Difference of Arrival) — это алгоритм позиционирования, основанный на

разнице времени прихода сигналов. Схема принципа трехмерного позиционирования показана на рисунке 3.2.

$$d1 - d2 = (t1 - t2) \cdot v \quad (3.32)$$

$$d1 - d3 = (t1 - t3) \cdot v \quad (3.33)$$

$$d1 - d4 = (t1 - t4) \cdot v \quad (3.34)$$

$$d1 = \sqrt{((x - x1) \cdot (x - x1) + (y - y1) \cdot (y - y1) + (z - z1) \cdot (z - z1))} \quad (3.35)$$

$$d2 = \sqrt{((x - x2) \cdot (x - x2) + (y - y2) \cdot (y - y2) + (z - z2) \cdot (z - z2))} \quad (3.36)$$

$$d3 = \sqrt{((x - x3) \cdot (x - x3) + (y - y3) \cdot (y - y3) + (z - z3) \cdot (z - z3))} \quad (3.37)$$

$$d4 = \sqrt{((x - x4) \cdot (x - x4) + (y - y4) \cdot (y - y4) + (z - z4) \cdot (z - z4))} \quad (3.38)$$

Пусть положение s1 равно (x1, y1, z1), положение s2 равно (x2, y2, z2), положение s3 равно (x3, y3, z3), положение s4 равно (x4, y4, z4).

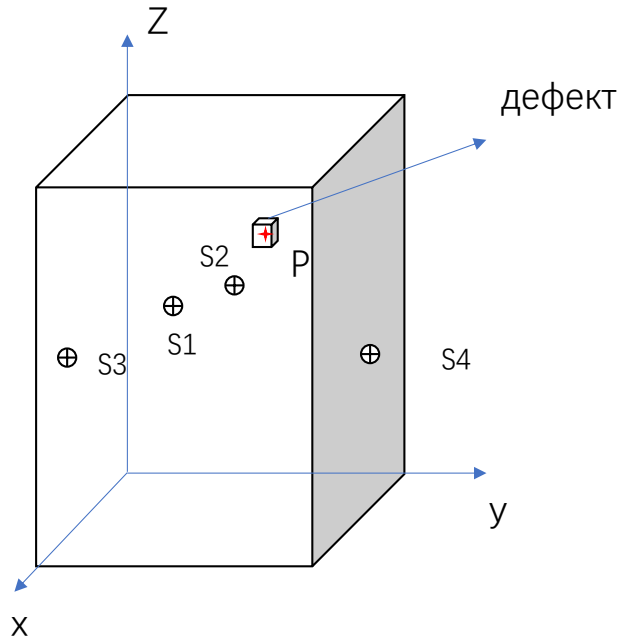


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема алгоритма трехмерного позиционирования TDOA

Требуется, чтобы точки возбуждения звука s1-s4 не находились в одной плоскости. Расстояния от точки удара шарика по образцу до дефекта равны d1, d2, d3, d4 соответственно. Времена прихода акустической волны к дефекту равны t1, t2, t3, t4 соответственно. Объединяя

формулы 3.32-3.38 и применяя метод наименьших квадратов, можно определить координаты дефекта. Другими словами, алгоритм использует параметры первого времени прибытия акустических и электрических сигналов, полученные с помощью численного моделирования или физических экспериментальных измерений, для обнаружения внутренних дефектов.

3.2 Моделирование акустико-электрических преобразований дефектных диэлектрических материалов при импульсном акустическом возбуждении

В общем случае описание движения деформируемых твердых тел в трехмерном пространстве описывается уравнением (3.39):

$$\rho \ddot{U}_i = \rho G_i + \sigma_{ij,j} \quad (3.39)$$

где ρ - плотность, $\ddot{U}_i$ - частная производная смещения по времени, $\sigma_{ij,j}$ - напряжение, G_i - компонент вектора массы-силы, и $i, j = 1, 2, 3..$ Точка над символом указывает на производную по времени, а запятая после индекса указывает на производную соответствующей координаты. Суммирование, выполненное по повторяющимся индексам, показано в уравнении (3.40):

$$\sigma_{ij,j} = \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3} \quad (3.40)$$

Соотношение между компонентой тензора деформации соотношения Коши и смещением выражается в уравнении (3.41):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (3.41)$$

А определяющие соотношения между компонентами тензора напряжения и деформации показано в уравнении (3.42):

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \quad (3.42)$$

При проведении экспериментов в лабораторных условиях в процессе создании акустического воздействия и регистрации электромагнитного отклика измерительные устройства и датчики размещаются на образце. Схемы измерения и расчетная область показана на рисунке 3.3. Граничные условия соответствуют фиксированным и нагруженным условиям в

экспериментальной установке, поэтому напряжение на границе равно нулю. В трехмерном случае компоненты вектора напряжений на свободной границе отсутствуют, как показано в уравнении (3.43):

$$\sigma_n = 0, \sigma_{\tau 1} = 0, \sigma_{\tau 2} = 0 \quad (3.43)$$

где σ_n — нормальные напряжения, а $\sigma_{\tau 1}, \sigma_{\tau 2}$ — касательные напряжения.

В середине вертикального размера образца по нормали (в точке А) приложена нагрузка в виде, показанном в уравнении (3.44-3.46):

$$\sigma_n = T(t) \cdot F(x, z) \quad (3.44)$$

$$\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = 0 \quad (3.45)$$

$$F(x, z) = A \cdot \exp\left(-\beta \frac{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}{2d_0^2}\right) \quad (3.46)$$

где $T(t)$ - функция t , определяющая закон изменения нагрузки во времени, $F(x, z)$ - функция, определяющая закон изменения нагрузки по поверхности (в двумерном случае - по контурной линии), последние компоненты вектора нагрузки не учитываются.

Для расчетов использовалась зависимость $T(t)$ в виде полужатухающей синусоиды, как показано в уравнении (3.47, 3.48):

$$T(t) = e^{-\beta t} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \cdot \eta(t) \quad (3.47)$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases} \quad (3.48)$$

где τ - время воздействия нагрузки, зависящее от длительности детерминированного акустического импульса. Нагрузка определялась как постепенно возрастающая, а затем постепенно убывающая функция, зависящая от временных и пространственных координат.

Величина регистрируемого электромагнитного отклика зависит от изменения напряженности электрического поля в месте расположения приемника, площади приемника и величины входного сопротивления (как показано в уравнении 3.49).

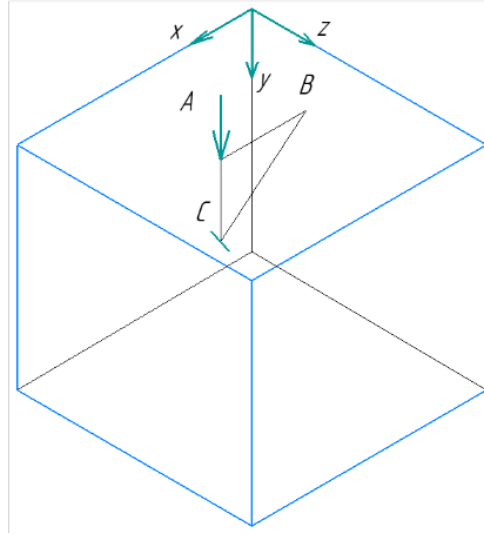


Рисунок 3.3 – Схема расчетной области

В уравнении x_0, z_0 — координаты центра источника акустических плюсов, а d_0 — величина, определяющая расстояние от центра импульса при уменьшении нормального напряжения до e^β .

Напряженность поля диполя на расстоянии r от точки приемника определяется по уравнению (3.50):

$$r = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \sum_t \frac{\sigma_{ijk}}{|\sigma_{ijk}|} \sqrt{\left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy dz \right)^2 + \left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{P_y (y_0 - y_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy dz \right)^2 + \left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{P_z (z_0 - z_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy dz \right)^2} \quad (3.50)$$

где l_x, l_y, l_z — максимальное значение координаты. P — электрический момент диполя, а ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды, в которой рассматриваемая точка имеет координаты x_0, y_0, z_0 , а центр приемного устройства имеет координаты x_1, y_1, z_1 .

3.3. Решение проблемы недостаточной частоты дискретизации данных измерений

Поскольку данные, полученные при практических измерениях сигналов, являются дискретными, а временное разрешение измеренных точек данных не соответствует требованиям алгоритма локализации внутренних дефектов образца, необходимо использовать алгоритмы аппроксимации кривых для обработки данных. Это может увеличить частоту дискретизации за счет добавления точек данных для соответствия требуемым требованиям точности вычислений.

Аппроксимация кривой — это численный метод, заключающийся в приближенном описании или моделировании функциональной зависимости между координатами дискретного набора точек на плоскости с помощью непрерывной кривой [112]. В данном случае не требуется, чтобы приближенная функция точно совпадала с реальными значениями в узловых точках. Достаточно, чтобы кривая наилучшим образом приближалась к исходным данным.

В экспериментальных данных и анализе моделей применение методов аппроксимации для интерполяции данных играет крайне важную роль в научно-исследовательской работе. В данном разделе представлены различные алгоритмы аппроксимации кривых, которые могут быть использованы для обработки дискретных точек экспериментальных данных. Путем сравнительного анализа точности различных методов аппроксимации выбирается алгоритм с наивысшей точностью аппроксимации для выполнения интерполяции данных.

3.3.1 Алгоритм подгонки кривой кубического В-сплайна

Кубический В-сплайн — это аппроксимирующая кривая, обладающая свойствами геометрической инвариантности, непрерывности, рекуррентности и симметрии, что позволяет удобно вносить локальные изменения в аппроксимирующую кривую. Благодаря ограничению характеристическим многоугольником, она также обладает свойством выпуклой оболочки, что гарантирует расположение точек данных внутри выпуклой оболочки исходной кривой. Это

позволяет приближенно определить положение отсутствующих точек данных и сохранить целостность аппроксимации. Базисная функция В-сплайна выражается следующим образом:

$$F_{i,k}(t) = \frac{1}{k!} \sum_{m=0}^{k-i} (-1)^m \cdot C_{k+1}^m \cdot (t = t + k - m - j)^k \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (3.51)$$

В формуле индекс j обозначает номер узла кривой, а $i = 0, 1, 2, \dots, N$. Кубический В-сплайн формируется путем соединения нескольких сегментов кривой в непрерывную кривую, при этом $i = 3$. Общее выражение для В-сплайновой кривой выглядит следующим образом:

$$G(t) = \sum_{i=0}^n G_i \cdot F_{i,k}(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (3.52)$$

В формуле G_i обозначает контрольные точки (характерные точки), определяющие форму кривой. Кубический В-сплайн может быть задан с помощью четырёх соседних контрольных точек (G_0, G_1, G_2, G_3) , и тогда по формуле (3.51) можно вычислить:

$$\begin{aligned} F_{0,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j \cdot C_4^j \cdot (t + 3 - 0 - j)^3 \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t + 3)^3 + (-1)^1 C_4^1 (t + 2)^3 + (-1)^2 C_4^2 (t + 1)^3 + (-1)^3 C_4^3 t^3] \\ &= \frac{1}{6} (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) = \frac{1}{6} (1 - t)^3 \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} F_{1,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^2 (-1)^j \cdot C_4^j \cdot (t + 3 - 1 - j)^3 \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t + 2)^3 + (-1)^1 C_4^1 (t + 1)^3 + (-1)^2 C_4^2 t^3] = \frac{1}{6} (3t^3 - 6t^2 + 4) \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} F_{2,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^1 (-1)^j \cdot C_4^j \cdot (t + 3 - 2 - j)^3 \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t + 1)^3 + (-1)^1 C_4^1 t^3] = \frac{1}{6} (-3t^3 - 3t^2 - 3t + 1) \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$F_{3,3}(t) = \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j \cdot C_4^j \cdot (t + 3 - 0 - j)^3 = \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 t^3] = \frac{1}{6} t^3 \quad (3.56)$$

Подставив формулы (3.53-3.56) в выражение (3.52), получим общее уравнение

кубического В-сплайна:

$$G(t) = G_0 * F_{0,3}(t) + G_1 * F_{1,3}(t) + G_2 * F_{2,3}(t) + G_3 * F_{3,3}(t) \quad (0 \leq t \leq 1)$$

$$= \frac{1}{6} [t^3 \ t^2 \ t^1 \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

При непрерывном изменении параметра t формируется гладкий сегмент В-сплайновой кривой. В случае, когда задано N контрольных точек, последовательное смещение на $N-3$ позиций позволяет построить кубический В-сплайн.

3.3.2 Алгоритм подгонки кубической сплайновой кривой

Предположим, что в наборе дискретных точек данных интервал (a, b) подвергается разбиению. Пусть кубический сплайн-функция обозначается как $S(x)$, где $x = a < x_0 < x_1 < \dots < x_n$, а соответствующие координаты y заданы как $(y_0, y_1, \dots, y_n)$. Поскольку кривая кубического сплайн-интерполяции определяется в виде кусочно-заданной функции, использование предоставленных $n+1$ дискретных точек данных позволяет получить n интервалов. Кроме того, для обеспечения устойчивости и точности сплайн-функции необходимо выполнение следующих условий:

Кубическая полиномиальность на каждом подинтервале предполагает, что на каждом отрезке разбиения (x_{i+1}) функция $S(x) = S_i(x)$ является кубическим полиномом.

Интерполяционное условие предполагает, что значения сплайна совпадают с заданными точками: $S(x)_i = y_i \ (i = 0, 1, \dots, n)$.

Условие гладкости, это когда в функции $S(x)$ её первая производная $S'(x)$ и вторая производная $S''(x)$ непрерывны на всём интервале $[a, b]$. Это обеспечивает гладкость (отсутствие изломов) сплайн-кривой.

Из-за наличия шума в измеренных данных прямое интерполяционное приближение может

привести к чрезмерным колебаниям кривой (переобучению). В этом случае кривой разрешено не проходить через точки данных полностью, но ошибка подгонки и гладкость кривизны уравниваются путем минимизации следующей целевой функции:

$$\min \left\{ \alpha \sum_{i=1}^n (y_i - S(x_i))^2 + (1 - \alpha) \int_{x_1}^{x_n} [S''(x)]^2 dx \right\} \quad (3.58)$$

Среди них $\alpha \in [0,1]$ является параметром компромисса.

3.3.3 Алгоритм вейвлет-подгонки

Вейвлет-интерполяционная реконструкция представляет собой процесс «разложение – коррекция – восстановление» и включает три этапа:

1. Разделение измерительного сигнала на перекрывающиеся блоки с их независимой обработкой и многоуровневым вейвлет-разложением каждого блока;
2. Извлечение коэффициентов низкочастотно и высокочастотно составляющих с последующей неравномерной интерполяцией в вейвлет-пространстве коэффициентов;
3. Обратное вейвлет-преобразование интерполированных коэффициентов в сигнал временной области и объединение всех блоков в итоговый реконструированный сигнал.

3.3.4 Сравнение эффектов различных алгоритмов подгонки

В эксперименте устройство, показанное на рисунке 2.1, использовалось для измерения электрического сигнала, генерируемого дефектным образцом при стимуляции акустической волной. Измеренные данные представлены на рисунке 3.4а. Набор данных содержит 80 000 точек измерений с временным разрешением 10^{-6} секунды. На рисунке 3.4б показан результат преобразования Фурье для измеренных данных. Согласно теореме Найквиста о дискретизации, частота дискретизации должна быть как минимум в два раза больше самой высокой частоты сигнала. Если фактическая полоса пропускания сигнала низкая, эффективную частоту

дискретизации можно увеличить путем интерполяции. Самая высокая частота сигнала на рисунке 3.4б намного меньше 500 кГц, поэтому интерполяционная обработка измеренного сигнала в эксперименте является разумной.

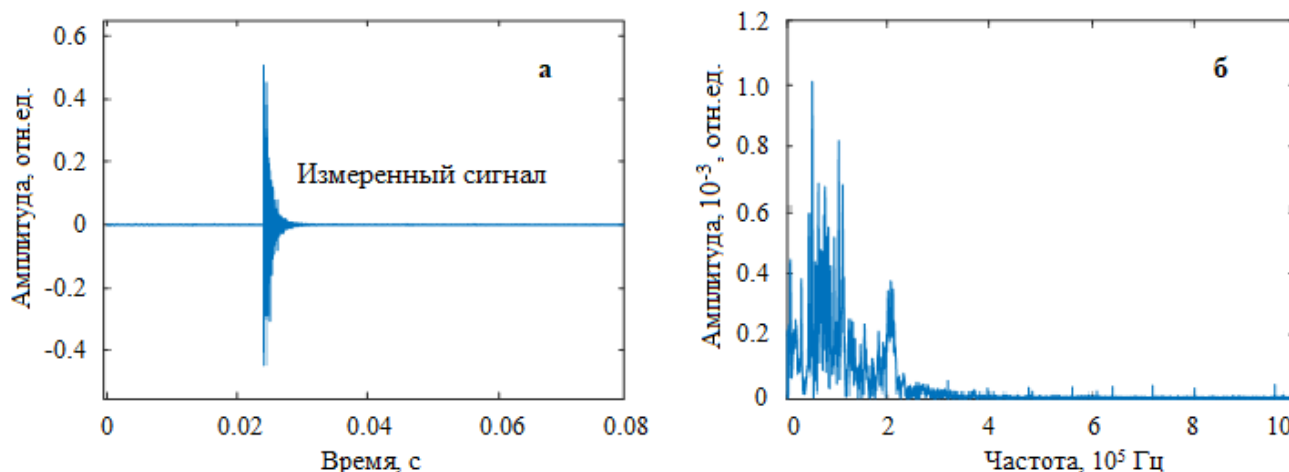


Рисунок 3.4 – Результаты акустико-электрического контроля дефектных образцов

Диаграмма Тейлора (Taylor Diagram), предложенная Тейлором К. Е. в 2001 году, эффективно и наглядно демонстрирует различия в производительности нескольких моделей, а также величину ошибки между моделями и реальными значениями. Она объединяет такие статистические показатели, как коэффициент корреляции, отношение стандартных отклонений и среднеквадратическую ошибку, комплексно отображая степень соответствия данных на двумерной диаграмме. Точка (0, 1) здесь соответствует эталонным наблюдениям — чем ближе результаты вычислений к этой точке, тем лучше аппроксимация алгоритма.

Как видно из рисунка 3.5, эффекты подгонки алгоритма подгонки кубическим сплайном и алгоритма подгонки кубическим В-сплайном относительно хороши, среди которых наилучший эффект подгонки имеет алгоритм кубического В-сплайна.

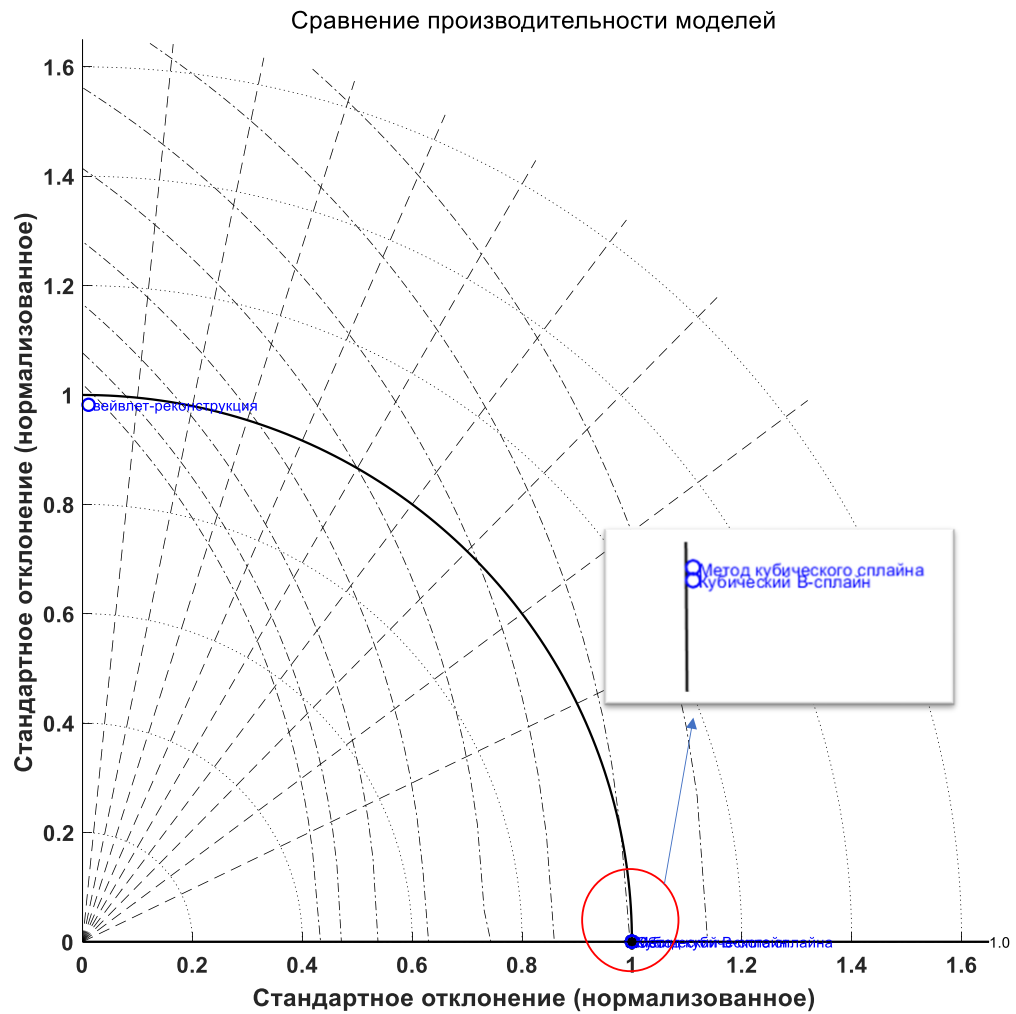


Рисунок 3.5 – Нормализованная диаграмма Тейлора

Далее три метода используются для интерполяции измеренных данных на рисунке 3.4а и выполнения преобразования Фурье. Как показано на рисунках 3.6–3.8, после интерполяционной обработки количество точек данных составляет $8 \cdot 10^7$, а временное разрешение — 10^{-9} секунд.

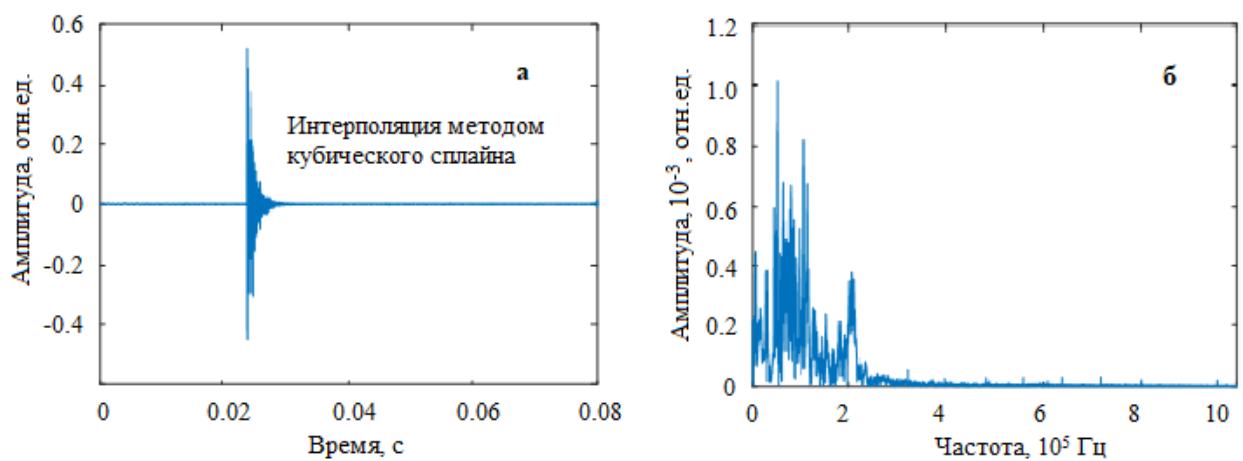


Рисунок 3.6 – Данные интерполяции метода кубического сплайна (а) и результаты его преобразования Фурье (б)

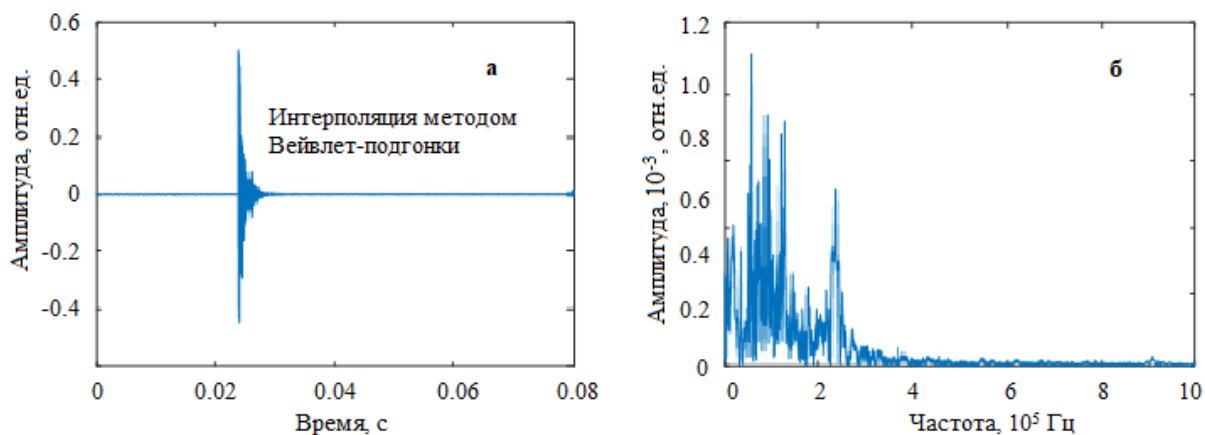


Рисунок 3.7 – Данные вейвлет-интерполяции (а) и результаты их преобразования Фурье (б)

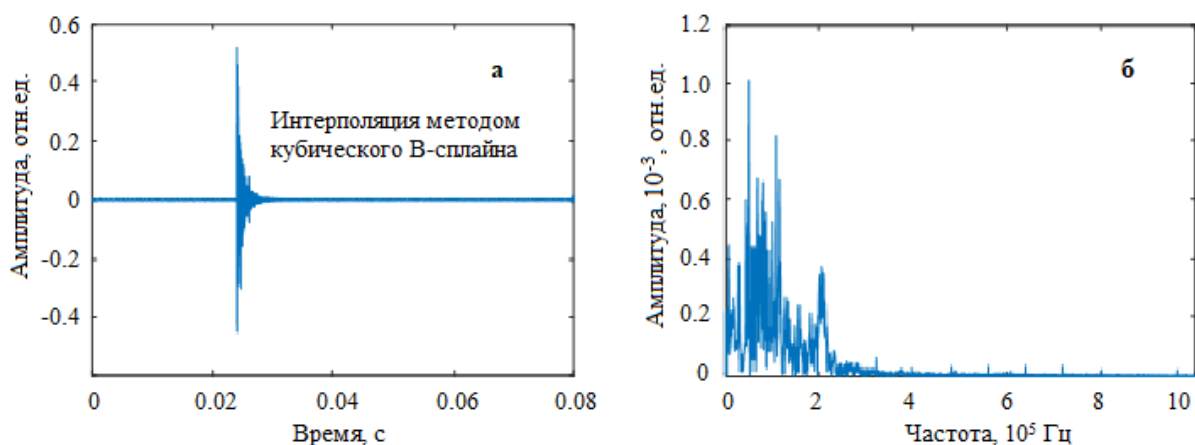


Рисунок 3.8 – Данные интерполяции кубического В-сплайна (а) и результаты его преобразования Фурье (б)

По сравнению с измеренным сигналом, форма сигнала временной области не меняется после интерполяции тремя методами. Однако в форме сигнала частотной области метод вейвлета вводит ложные частотные компоненты в данные после интерполяции.

Таким образом, в параграфах 3.1, 3.2 и 3.3 предложен метод выделения первых вступлений сигналов ЭМС при их возбуждении в процессе акустико-электрического преобразования в дефектных твердотельных модельных и реальных образцах при внешнем детерминированном импульсном акустическом возбуждении. Этот же метод может быть использован при нагружении

образцов сжатием или сдвиговыми нагрузками при развитии трещин в процессе разрушения. Разработан трёхмерный алгоритм локации дефектов, основанный на модели генерации электромагнитных сигналов в процессе акустико-электрического преобразования.

3.4 Локация дефектов на основе модели генерации электромагнитных сигналов в процессе акустико-электрического преобразования.

3.4.1 Эксперименты по моделированию акустико-электрического преобразования внутренних дефектов различных размеров в диэлектрических материалах

Размер блока в конечно-элементной модели составляет $(10^{-3} \times 10^{-3}) \text{ м}^2$. Значения свойств образца бетонного песка заданы следующим образом: плотность $2.3 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $3.3 \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона 0.2; скорость распространения волны $3.6 \times 10^3 \text{ м/с}$. Расчеты включают 237, 500 точек с частотой дискретизации 10^{-6} секунд. Расчеты проводились для упругих образцов магнетита, используемых для экспериментов по ступенчатому сжатию и последующего детерминированного акустического импульсного ступенчатого возбуждения. Указанное расположение трещин показано на рисунке 3.9.

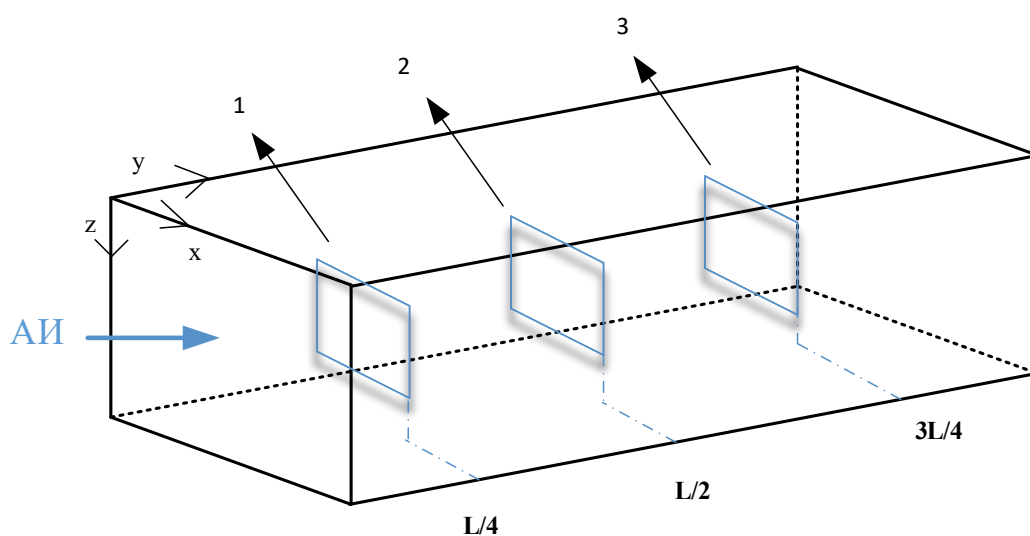


Рисунок 3.9 – Диаграмма размещения дефектов образца (Синие квадраты представляют площадь дефекта, $L=90 \text{ м}^3$)

Численное моделирование упругих возмущений проводилось в образце с размерами $(50 \times 50 \times 90) \times 10^{-9} \text{ м}^3$, где стороны возбуждались акустическими импульсами. Целесообразно рассматривать эту задачу в плоском формате, то есть аксиальный размер поперечного сечения образца составляет $(50 \times 50) \times 10^{-6} \text{ м}^2$. Результаты численного моделирования выражены в виде амплитуды напряженности электрического поля. Построенная математическая модель используется для анализа распространения упругих волн в образцах при импульсном механическом воздействии.

На рисунке 3.10. видно, что основные пиковые частоты ЭМС находятся вблизи 41 кГц и 58 кГц. Сравнивая амплитуды ЭМС двух основных частотных пиков, можно обнаружить, что амплитуда ЭМС на частоте 41 кГц по амплитуде больше, когда место дефекта находится дальше от акустического возбуждения АИ. Чем больше площадь дефекта, тем выше амплитуда основного пика на частоте 41 кГц. Максимальная амплитуда на частоте 41 кГц превышает максимум амплитуды на частоте 58 кГц на рисунке 3.10 (С2).

Расположение дефектов на рисунке 3.12 параллельно плоскости yz , а расчеты выполнены в разных положениях (1, 2, 3). Результаты расчетов показаны на рисунке 3.12. Вид и амплитуды ЭМС существенно различается из-за разного положения дефектов, разных углов распространения одного и того же направленного источника звука, проходящего через область размещения дефектов образца.

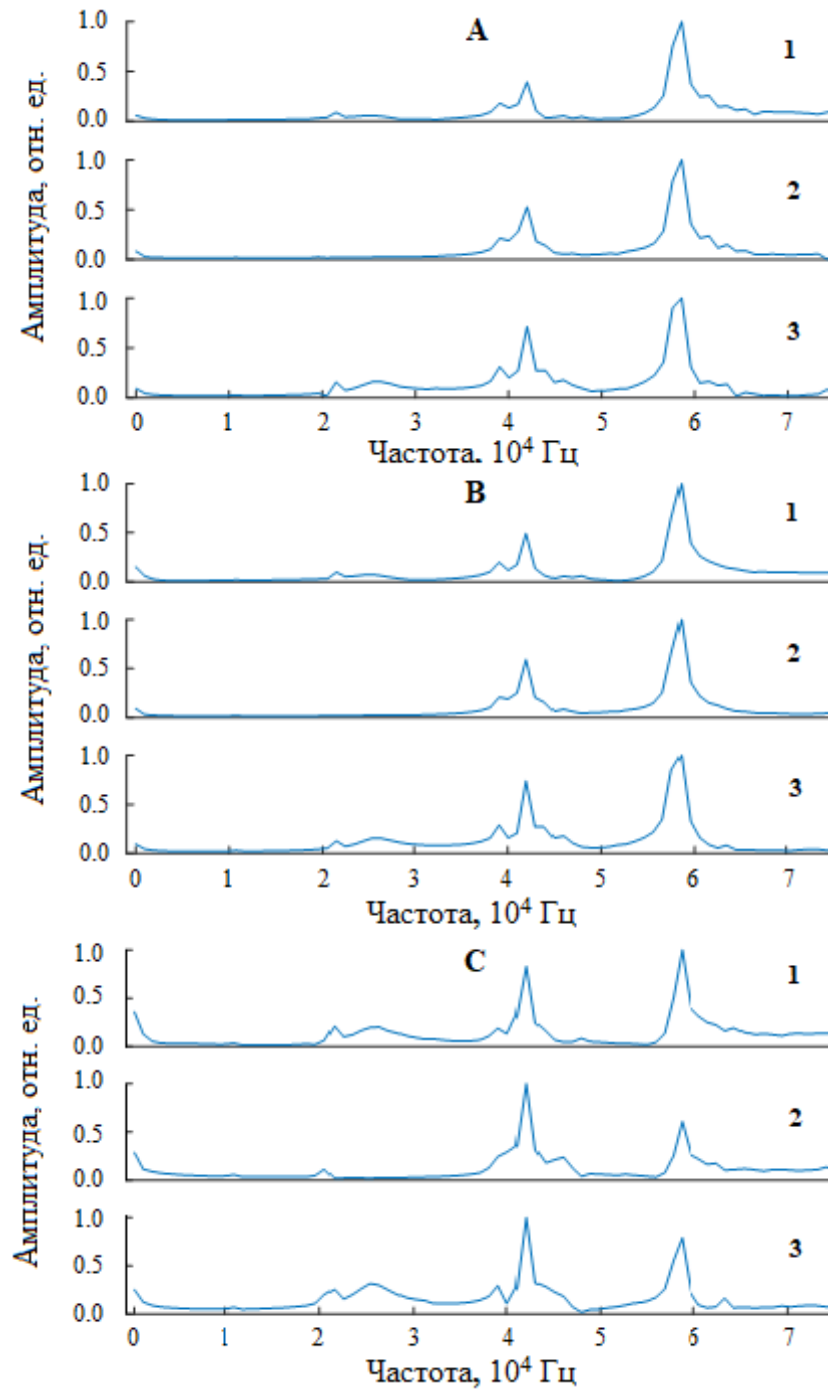


Рисунок 3.10 – Электромагнитный ответный сигнал, рассчитанный с использованием модели рисунка 3.9, где цифры 1,2,3 указывают на размещение дефектов в образце. Площадь поперечного сечения дефекта задана: А – (10×10) мм², В – (20×20) мм², С – (30×30) мм²

Поэтому спектральные распределения электромагнитного отклика на детерминированное акустическое возбуждение характеризуются по-разному. По мере уменьшения угла между

источником и дефектом к 0° величина амплитуды на частоте 40 кГц будет больше.

Чтобы изучить связь между откликом электромагнитного излучения при внешнем одинаковом акустическом возбуждении и объемом дефектов внутри образца, воспользовались при расчетах дефектом размером $(10 \times 10 \times 1) \text{ мм}^3$, а затем увеличивали его размер вдоль оси образца. (как показано на рисунке 3.13).

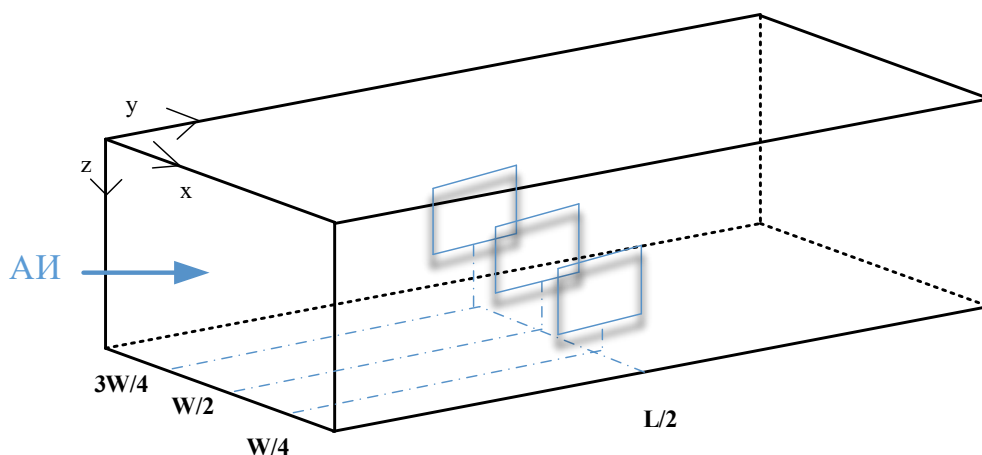


Рисунок 3.11 – Пример схемы расположения дефектов (Синие квадраты обозначают площадь дефекта. Площадь поперечного сечения дефекта составляет $(10 \times 10) \text{ мм}^2$, $D=90 \text{ м}^{-3}$, $W=50 \text{ м}^{-3}$)

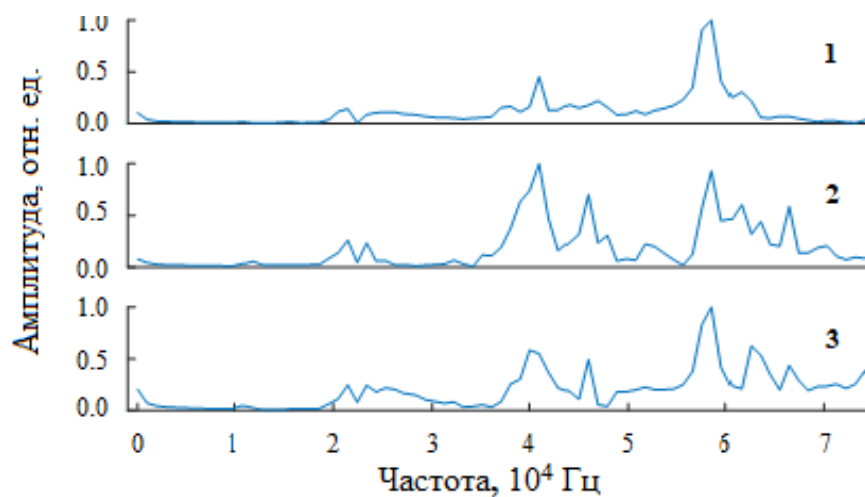


Рисунок 3.12 – Электромагнитный ответный сигнал, рассчитанный с использованием модели рисунка 3.11 (1, 2, 3 соответствует расположению дефектов на рисунке 3.11)

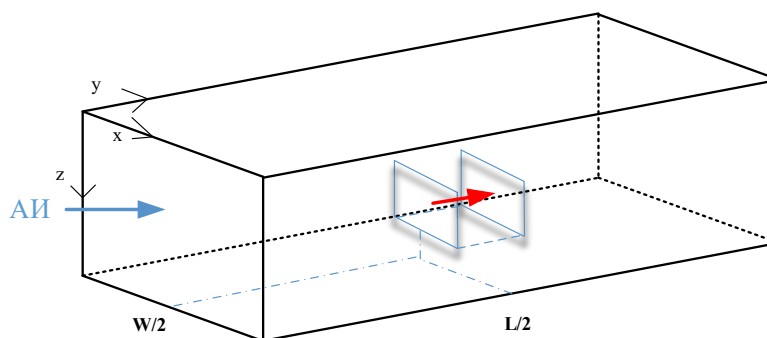


Рисунок 3.13 – Диаграмма размещения дефектов образца (синие квадраты обозначают площадь дефекта, а направление красной стрелки — направление увеличения дефектов. $L=90 \text{ м}^{-3}$)

$$\Delta U = \sum_t^0 E(t) \quad (3.59)$$

В формуле (3.59) ΔU представляет собой сумму амплитуд электромагнитных откликов образцов с дефектами, и можно заметить, что отклик электромагнитного излучения линейно связан с объемом дефектов внутри образцов (как показано на рисунке 3.14).

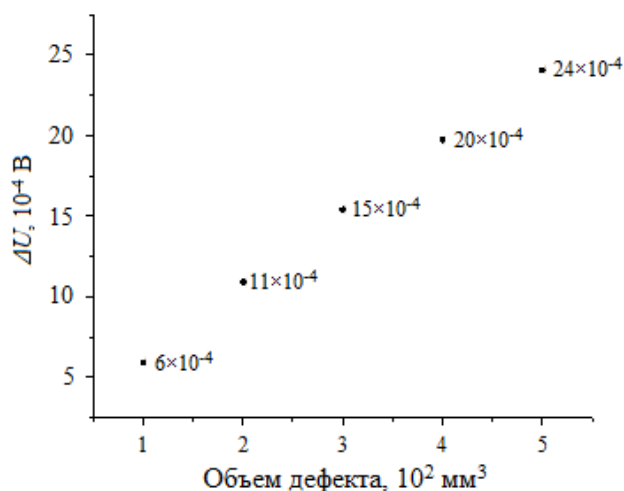


Рисунок 3.14 – Зависимость амплитуды сигнала электромагнитного отклика от объема дефектов внутри образца

3.4.2 Алгоритм трехмерной локализации дефектов

Для проверки предложенной методики локализации дефектов в гетерогенных средах было проведено конечно-элементное моделирование. С использованием программного обеспечения COMSOL была создана трехмерная конечно-элементная модель гетерогенной структуры размером $(100 \times 100 \times 100) \text{ мм}^3$, состоящей из гранита и воздушного пузырька, представляющего внутренний дефект.

Таблица 3.1 – Свойства материалов, используемых в модели

Материал	Модуль Юнга, Е (Па)	Коэффициент Пуассона, σ	Плотность, ρ (kg/m ³)
Гранит	60×10^9	0.25	2600
воздух	-	0	1.29

Для вычислений использовалась явная модель упругих волн во временной области, при этом все границы были смоделированы как обладающие очень малым отражением этих волн, чтобы минимизировать отражения от стенок, достигающих точки наблюдения. Сетка конечных элементов создавалась опцией программы COMSOL, обеспечивающей автоматическое ее построение с использованием тетраэдрических твердотельных элементов. Внутренний дефект был смоделирован как кубическая воздушная полость с длиной ребра 5 мм, а его центр был принят за истинное местоположение дефекта, как показано на рисунке 4.7. Местоположение дефекта можно представить в координатах, как (xx, yy, zz) , а расстояние между местоположением дефекта и истинным местоположением (x_p, y_p, z_p) использовалось для расчета ошибки его нахождения при расчетах:

$$error = \sqrt{(x_p - xx)^2 + (y_p - yy)^2 + (z_p - zz)^2} \quad (3.60)$$

В качестве источника возбуждения к дефектной структуре была приложена полусферическая граничная нагрузка радиусом 1 мм для моделирования давления упругой волны, генерируемой в точке удара. Нагрузка был выбрана в виде синусоидальной функции с частотой 150 кГц. Сетка конечных элементов для проведения расчетов были сгенерированы по всей области дефектной структуры. В результате этой разметки общее количество элементов составило 379 904. Затем для решения поставленной задачи была применена программа расчетов переходных процессов во временной области.

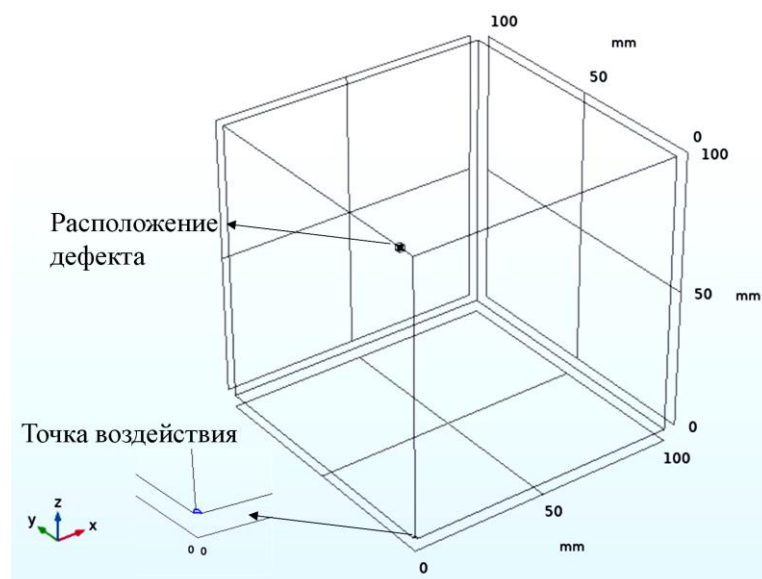


Рисунок 3.15 – Модель объемной гетерогенной структуре размером $(100 \times 100 \times 100)$ мм³, содержащей 379904 конечных элементов.

Координаты точек упругого воздействия ударом шарика представлено в таблице 3.2. Датчик помещали в центре дефекта, а амплитуда изменения давления в месте расположения дефекта рассчитывалась с использованием различных положений акустического возбуждения.

Таблица 3.2 Координаты точек введения акустического импульса (мм)

Точка удара	S1	S2	S3	S4
Расположение точки удара	(20,0,0)	(0,20,0)	(0,0,20)	(0,0,0)
Точка удара	S5	S6	S7	S8
Расположение точки удара	(20,100,0)	(0,80,0)	(0,100,20)	(0,100,0)

Определение положения дефекта в трехмерной неоднородной структуре по параметрам регистрируемых датчиками акустических сигналов очень затруднительна. Это обусловлено тем, что в дополнение к внутренним неоднородностям появляется существенная ошибка из-за контакта любого акустического датчика с образцом. Такая ошибка полностью исключается при

регистрации электромагнитных сигналов, возникающих на границах дефектов и вмещающего диэлектрического материала, так как не требует непосредственного контакта. Поскольку в используемом при расчетах программном обеспечении COMSOL нет модуля моделирования для акустоэлектрического преобразования, в данной работе использовался акустический модуль. Механическое смещение и тензор напряжений точки дефекта рассчитывали с использованием программы COMSOL. Затем, рассчитанные значения смещений и тензора напряжений подставляли в уравнение 3.1-3.2 для получения ЭМС в виде $u(t)$.

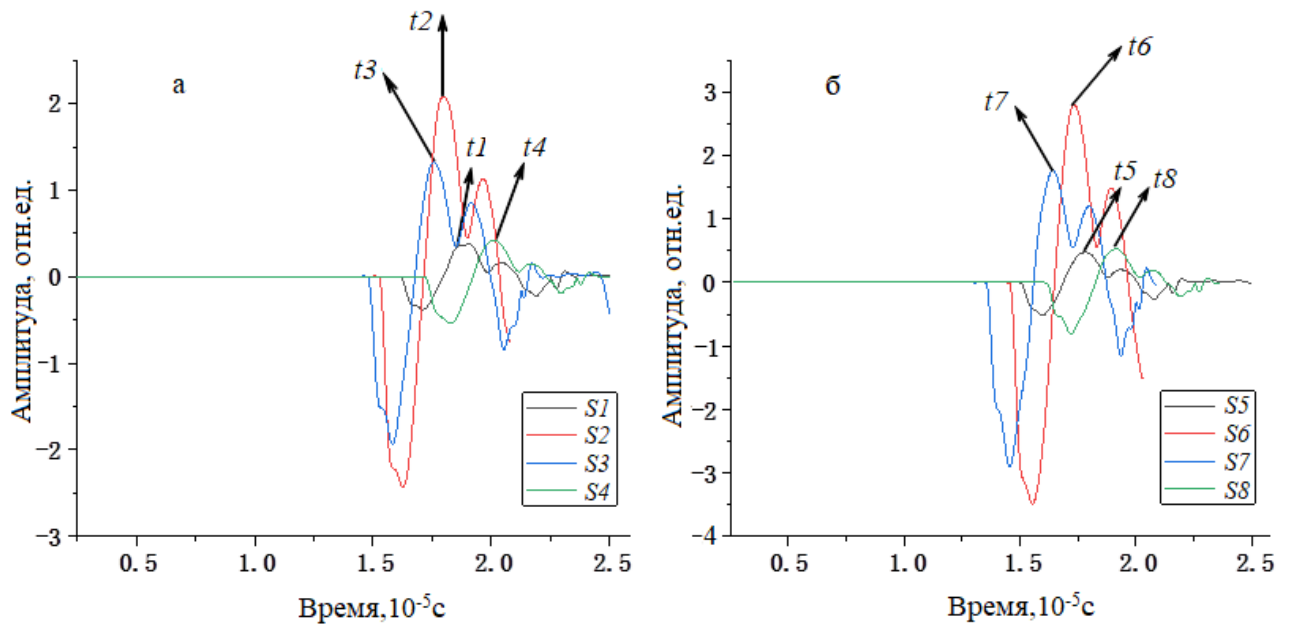


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования различных точек удара с центром дефекта, заданным в координатах (35, 55, 65). (S1-S8 представляют различные позиции удара, а соответствующие $t1-t8$ представляют различные времена прибытия первой волны)

В экспериментах по моделированию центр дефекта был установлен на (35, 55, 65), а результаты моделирования $u(t)$ показаны на рисунке 3.16. Используя время прибытия первой волны ($t1-t8$), извлеченное из рисунка 3.16, можно рассчитать прогнозируемое местоположение дефекта с помощью уравнений (3.22-3.24). Результаты расчета показаны на рисунке 3.17. Кроме того, было выполнено моделирование с различным размещением дефектов и сравнение истинных

местоположений дефектов с расчетными на основе данных моделирования. Результаты вариаций координат трехмерного модельного и истинного расположения дефекта приведены в таблице 3.3.

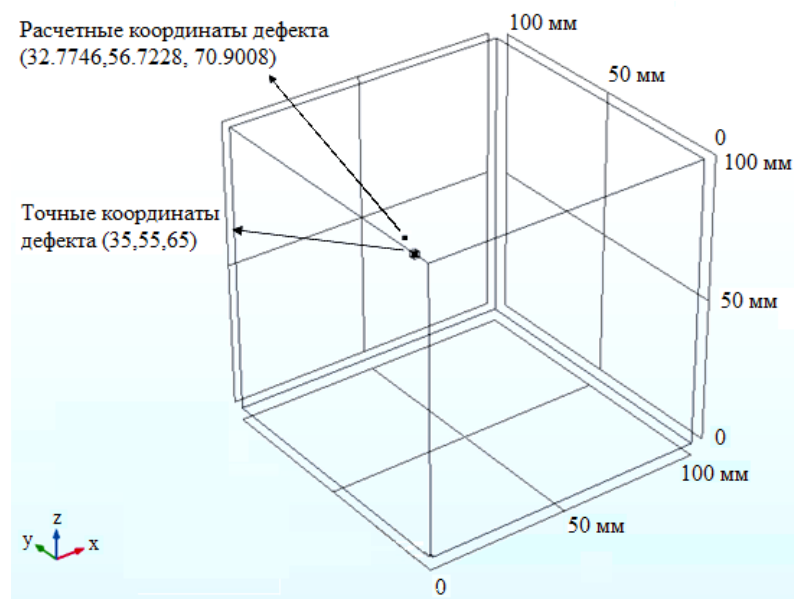


Рисунок 3.17 – Результаты прогнозирования координат дефекта по алгоритму 3D-позиционирования

Таблица 3.3 – Результаты расчета позиционирования по результатам моделирования

Точные координаты дефекта, мм	Прогнозируемое местоположение дефекта (мм)	Ошибка(мм)
(35,55,65)	(32.7746,56.7228,70.9008)	6.5376
(60,50,10)	(63.7009,50.4927,12.4465)	4.4637
(40,60,55)	(37.5978,62.6577,55.8973)	3.6931
(55,70,45)	(55.6668,75.0744,43.9253)	5.2296
(25,75,80)	(25.1136,75.0325,81.1970)	1.2028

При расчете модели, приведенной на рисунке 3.1б, параметры используемых материалов показаны в Таблице 3.4. Расположение точек удара представлено в Таблице 3.3. В рисунке 3.1б сторона u_a каждого слоя двухслойной трехмерной структуры установлена равной 50 мм. Расчет по этой модели провели по той же схеме, что и предыдущий. Затем временная информация подставляется в уравнения (3.29-3.31) согласно вышеописанному методу. Результаты расчетов

приведены в Таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Свойства материалов, используемых в расчетах по модели 3.1б

Материал	Модуль Юнга, Е (Па)	Коэффициент Пуассона, σ	Плотность, ρ (кг/м ³)
Гранит	60×10^9	0.25	2600
воздух	-	0	1.29
Бетон	225×10^9	0.20	2300

Таблица 3.5 – Результаты расчета координат дефекта по модели 3.1б

Точные координаты дефекта, мм	Прогнозируемое местоположение дефекта (мм)	Ошибка(мм)
(35,25,65)	(32.2735,21.9317,72.7773)	8.7940
(15,40,20)	(12.3162,48.5940,31.8213)	9.1856
(40,40,20)	(37.2332,37.4314,14.8159)	6.4131
(35,45,30)	(32.2125,42.1656,26.4846)	5.3068
(70,40,30)	(72.5779,43.8330,29.9534)	4.5737

Как показано в таблице 3.3 и таблице 3.5, небольшие погрешности в расчетах свидетельствуют о том, что предложенный метод позволяет точно локализовать дефекты в неоднородных конструкциях, а также проверить достоверность конечно-элементной модели.

Определение положения дефекта в трехмерной неоднородной структуре по параметрам регистрируемых датчиками акустических сигналов очень затруднительна. Это обусловлено тем, что в дополнение к внутренним неоднородностям появляется существенная ошибка из-за контакта любого акустического датчика с образцом. Такая ошибка полностью исключается при регистрации электромагнитных сигналов, возникающих на границах дефектов и вмещающего диэлектрического материала, так как не требует непосредственного контакта. Поскольку в используемом при расчетах программном обеспечении COMSOL нет модуля моделирования для акустоэлектрического преобразования, в данной работе использовался акустический модуль.

Механическое смещение и тензор напряжений точки дефекта рассчитывали с использованием программы COMSOL. Затем, рассчитанные значения смещений и тензора напряжений подставляли в уравнение 3.1-3.2 для получения ЭМС в виде $u(t)$.

Известно, что электромагнитный сигнал распространяется в образце со скоростью света, включая определенные поправки на плотность материала. Эта скорость значительно выше скорости звука в таком же веществе. Следовательно, время, необходимое для распространения сигнала акустико-электрического преобразования от исходного дефекта до приемника, пренебрежимо мало. Поэтому построенная в данной работе имитационная модель и расчеты с ее использованием показали эффективность метода трехмерной локализации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования. Результаты моделирования показали, что использование разнесенных точек удара для ввода акустического возбуждения, с последующей регистрацией времени прихода электромагнитного отклика и подстановкой этого времени в алгоритм трехмерной локализации для проведения вычислений, может надежно указать на местоположение дефектов внутри твердого диэлектрического материала. Сравнение внутреннего дефекта и рассчитанной прогнозируемой точки показано на рисунках 3.18 и 3.19.

Как видно из рисунка 3.19, метод триангуляции TODA позволяет эффективно определить местоположение дефекта. Однако этот метод неприменим к неоднородной структуре, представленной на рисунке 3.16.

Известно, что электромагнитный сигнал распространяется в образце со скоростью света, включая определенные поправки на плотность материала. Эта скорость значительно выше скорости звука в таком же веществе. Следовательно, время, необходимое для распространения сигнала акустико-электрического преобразования от исходного дефекта до приемника, пренебрежимо мало.

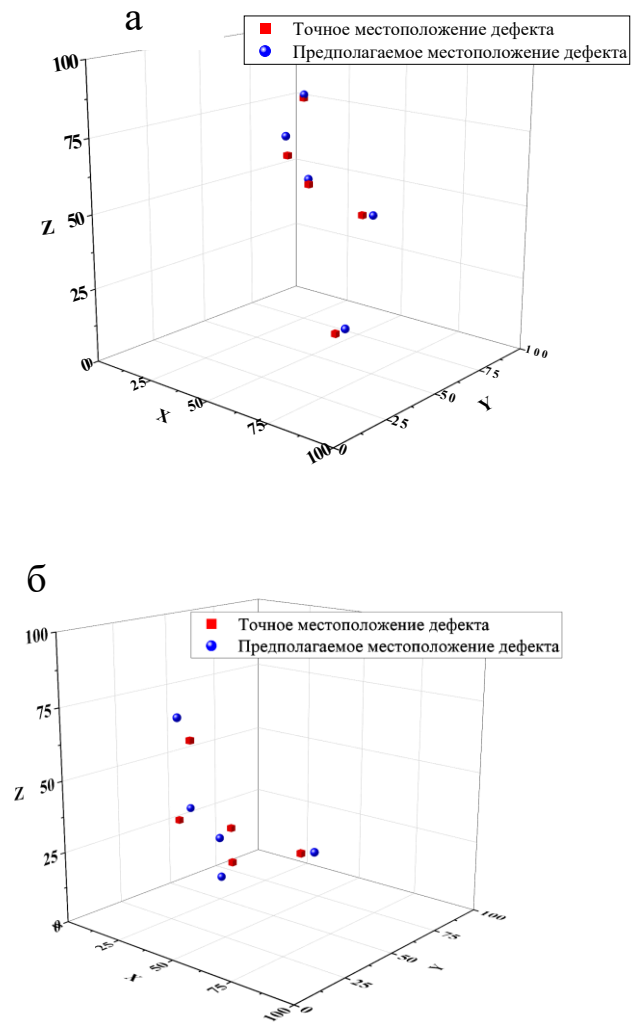


Рисунок 3.18 – Истинные и расчетные места расположения дефектов: а - однослойная трехмерная структура; б - двухслойная трехмерная структуры

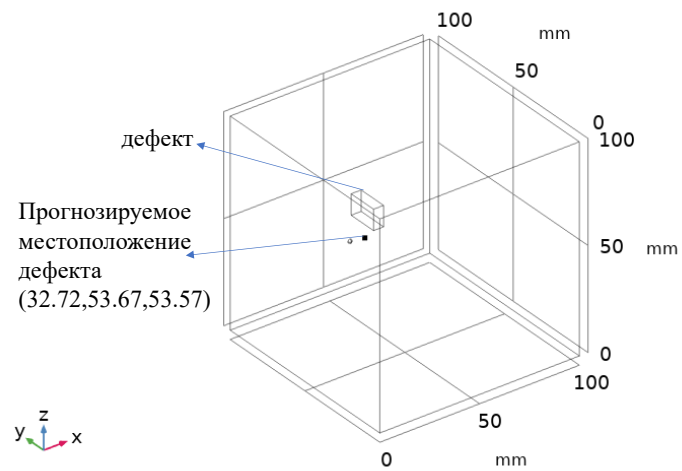


Рисунок 3.19 – Результаты прогнозирования координат дефекта с использованием алгоритма триангуляции TODA

Поэтому построенная в данной работе имитационная модель и расчеты с ее использованием показали эффективность метода трехмерной локализации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования. Результаты моделирования показали, что использование разнесенных точек удара для ввода акустического возбуждения, с последующей регистрацией времени прихода электромагнитного отклика и подстановкой этого времени в алгоритм трехмерной локализации для проведения вычислений, может надежно указать на местоположение дефектов внутри твердого диэлектрического материала. Сравнение внутреннего дефекта и рассчитанной прогнозируемой точки показано на рисунках 3.18 и 3.19.

Как видно из рисунка 3.19, метод триангуляции TODA позволяет эффективно определить местоположение дефекта. Однако этот метод неприменим к неоднородной структуре, представленной на рисунке 3.16.

3.5. Разработка метода прихода Р-волн для сигналов от трещин на примере упругих диэлектрических материалов в условиях сильного шума

Из-за характеристик переходного процесса, разнообразия и неопределенности сигнала разрыва горной породы, сигнал перемежается механической вибрацией, шумом окружающей среды, электромагнитным шумом и другими помехами, поэтому точная идентификация времени прибытия Р-волны в сигналах с низким SNR (отношение сигнал/шум, безразмерная величина, показывающая соотношение мощности полезного сигнала к мощности шума) по-прежнему является сложной задачей. Большинство ученых выполняли захват прихода Р-волны только на сигналах с добавлением гауссовского белого шума, чтобы проверить эффективность своих алгоритмов в условиях сильного шума. Однако во время измерения сигналов акустической эмиссии в промышленных условиях также включались импульсные шумовые сигналы. Импульсные помехи могут быть вызваны неисправностью измерительного прибора, внезапными изменениями и возмущениями в окружающей среде или по вине оператора. Более того, захват

прихода к принимающему датчику Р-волны очень затруднен под воздействием импульсного шума.

Внешние акустические импульсы, используемые при возбуждении ЭМС в процессе акустико-электрических преобразований, в лабораторных экспериментах создавались ударом шарика на установке, приведенной на рисунок 2.1. Было отобрано 30 групп данных измерений, полученных экспериментально. В каждую группу данных был добавлен гауссовский белый шум со стандартным отклонением 0.01. В результате таких искусственных добавлений шума было создано 60 групп данных, которые были использованы для проверки надежности предложенного метода автоматического отбора по первому приходу Р-волн. Каждая группа данных состоит из 10 000 точек данных, а интервал выборки составляет 1 миллисекунду.

Время прихода Р-волны измеренных лабораторных сигналов хорошо видно на рисунке 3.20а (сигнал с более высоким SNR). Время прихода Р-волны в течение 0.4758 секунды получено в данной работе с помощью ручного подбора. Однако для данных с добавлением шума, приведенных на рисунке 3.20б, достаточно трудно подобрать вручную время прихода Р-волны. Соотношения амплитуд сигнал/шум на рисунке 3.20б вычислялись в соответствие с данными расчетов, приведенные в разделе 2.2 формула 2.6 настоящей работы, в которой std является функцией расчета стандартного отклонения. Результат вычислений SNR составил величину - 12,2030 дБ. Поскольку измеренные данные содержат шум, фактический результат будет определенно ниже, чем текущий результат SNR. Поэтому данные на рисунке 3.20б были рассчитаны с помощью алгоритма CEEDMAN+Wavelet, предложенного в данной работе, и результаты абсолютной амплитуды показаны на рисунке 3.21а. Алгоритм может эффективно обесцвечивать белый шум, добавленный на рисунке 3.20б, что доказывает применимость алгоритма обесцвечивания.

Нормализованное преобразование STA/LTA было рассчитано с коротким временным окном в 50 мс и длинным временным окном в 5000 мс. Результат пикирования на рисунке 3.23б составляет 0,4924 с, а время прихода продольной волны, рассчитанное с помощью

CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA на рисунке 3.22, составляет 0,4841 с. Это означает, что алгоритм шумоподавления может улучшить точность STA/LTA. Кроме того, время прихода Р-волны, рассчитанное по абсолютной амплитуде и скорости изменения энергии, практически совпадает с результатом многократных расчетов, лишь изредка различаясь.

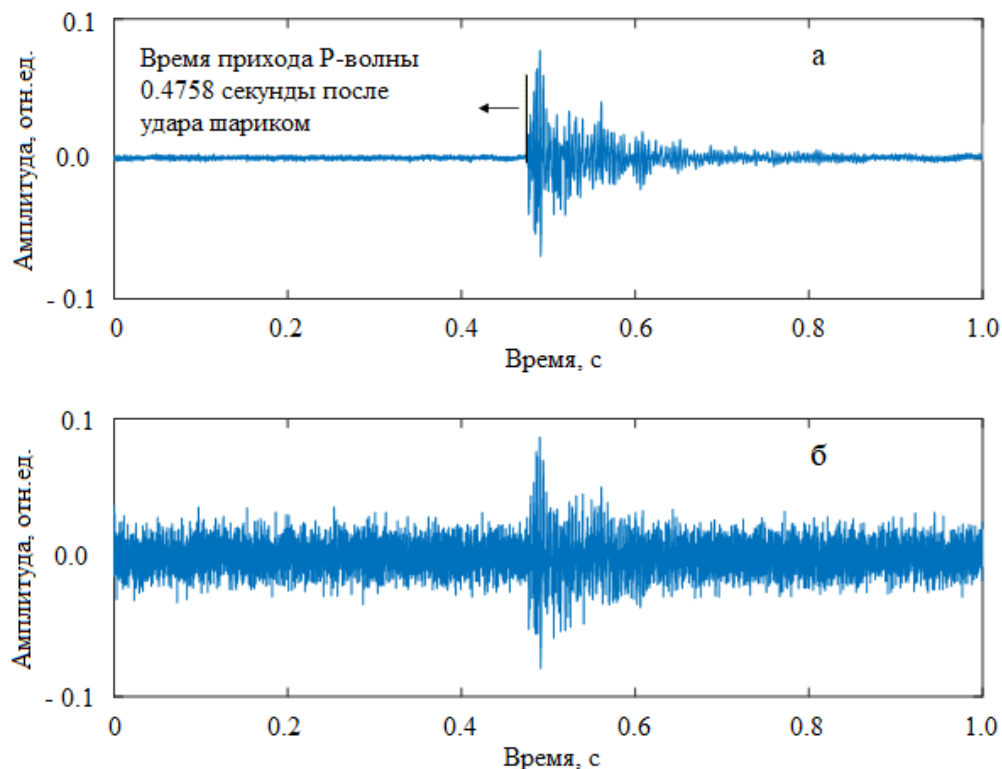


Рисунок 3.20 – Форма волны сигнала акустической эмиссии: а) сигнал до добавления гауссовского белого шума, время ручного подбора составляет 0,4758 секунды; б) сигнал после добавления гауссовского белого шума (время ручного подбора невозможно)

Сравнение рисунков 3.22 и 3.23 показывает, что STA/LTA может быть получен более интуитивно после нормализации из уравнения 3.4, и нет необходимости устанавливать порог для выбора времени прихода Р-волны. Результаты расчета данных приведены в Таблице 3.6, а результаты подбора с использованием только традиционного STA/LTA и AIC добавлены в таблицу для лучшего сравнения алгоритмов.

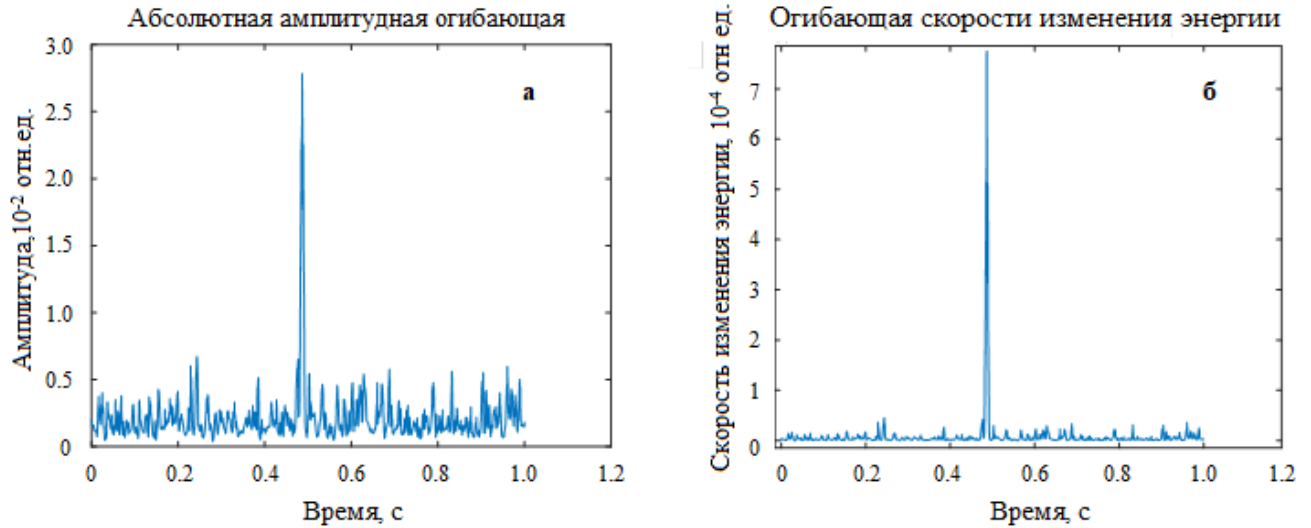


Рисунок 3.21 – Результат после обработки алгоритмом денуазинга (CEEDMAN+ Wavelet): а) абсолютная амплитуда; б) кривая скорости изменения энергии

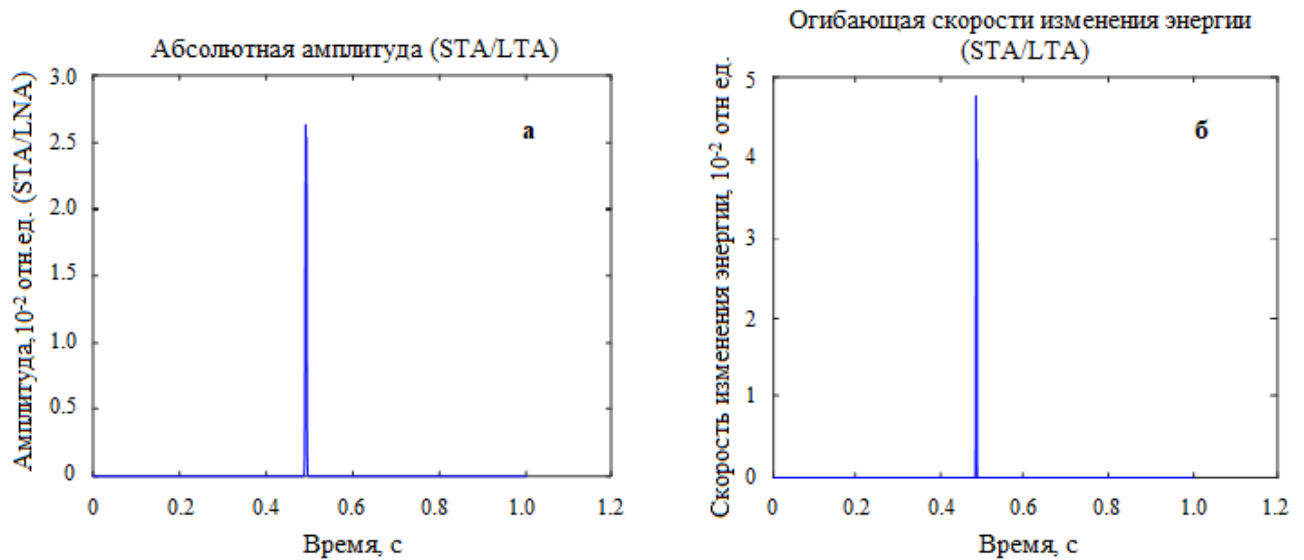


Рисунок 3.22 – Нормализованное преобразование STA/LTA сигнала на рисунке 3.21: а) абсолютная амплитуда; б) скорость изменения энергии

Результаты на рисунке 3.23а-это расчеты STA/LTA+AIC с использованием абсолютной амплитуды, огибающей Гильберта после процесса шумоподавления. В качестве точки отбора используется локальное минимальное значение кривой функции AIC, соответствующее времени прихода Р-волны 0,4799 с.

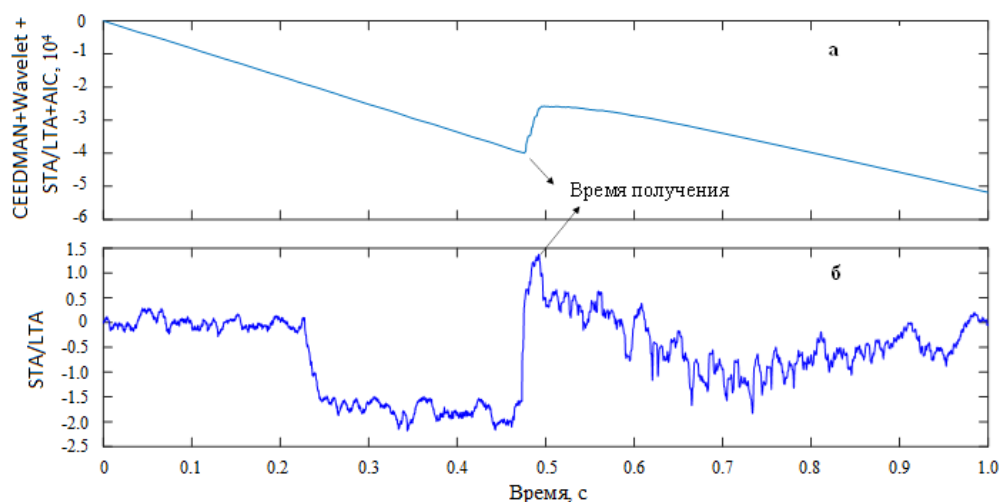


Рисунок 3.23 – Сравнение результатов выделения зашумленного помехами сигнала (из рисунка 3.20б): а) CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA+AIC (абсолютная амплитуда); б) традиционное преобразование STA/LTA

Таблица 3.6 – Анализ результатов измерения времени прихода Р-волны различными методами (интервал отношения сигнал/шум после добавления гауссовского белого шума составляет [-13 дБ, -9 дБ])

Ошибка подбора (мс)	лабораторные данные					Гауссовский белый шум, добавленный к лабораторным данным			
	STA/LTA	Абсолютная амплитуда и скорость изменения энергии (CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA)	AIC	Абсолютная амплитуда (CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA+AIC)	Скорость изменения энергии (CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA+AIC)	STA/LTA	Абсолютная амплитуда и скорость изменения энергии (CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA)	Скорость изменения энергии (CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA+AIC)	Абсолютная амплитуда (CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA+AIC)
(20,30]	6.67%	6.67%				13.33%			
(10,20]	40%	20.00%				46.67%	26.67%	13.3%	
(5,10]	40%	60.00%	6.67%	6.67%	13.33%	33.33%	66.67%	6.67%	13.3%
[0,5]	13.3%	13.33%	93.33%	93.33%	86.67%	6.67%	6.67%	80%	86.6%

Из Таблицы 3.6 можно сделать следующие выводы:

1. Времена первого прихода Р-волны, зарегистрированные AIC для лабораторных данных, наиболее близки к результатам «ручного» определения. Однако «ручное» определение прихода Р-волны затруднено из-за неопределенности при повышенной насыщенности помехами. В таких условиях достаточно трудно найти локальные минимумы и максимумы. Поэтому «ручное»

определение прихода Р-волны не показано в таблице.

2. Результаты подбора времени первого прихода продольной волны методом CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA+AIC для экспериментальных данных с добавлением гауссовского белого шума наиболее близки к результатам «ручного» подбора. Использование абсолютной амплитуды в качестве входных данных алгоритма является более точным, чем использование скорости изменения энергии.

3. CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA более точен, чем традиционный STA/LTA, и нет необходимости выбирать порог; пиком является время прихода Р-волны.

4. При использовании традиционного метода подбора STA/LTA можно добиться автоматического подбора в условиях интерференции гауссовского белого шума, но эффект несколько хуже, чем у CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA+AIC.

Чтобы исследовать влияние импульсного сигнала на алгоритм, к данным на рисунке 3.20 добавляется импульсный сигнал, вдвое превышающий пик данных экспериментальных измерений. Как показано на рисунке 3.24, три импульсных сигнала помещены в моменты времени 0.2 с, 0.3 с и 0.8 с, а SNR составляет -12.6141 дБ. Абсолютная амплитуда и скорость изменения энергии гильбертовой огибающей после обработки алгоритмом шумоподавления показаны на рисунке 3.25.

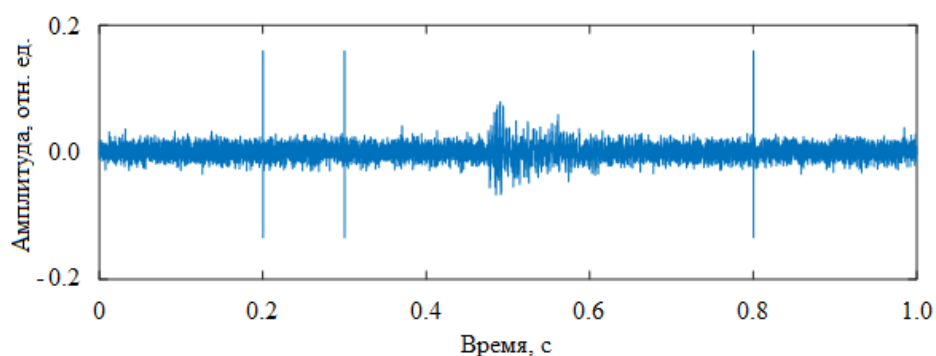


Рисунок 3.24 – Форма волны сигнала акустической эмиссии после добавления гауссовского белого шума и импульсного шума

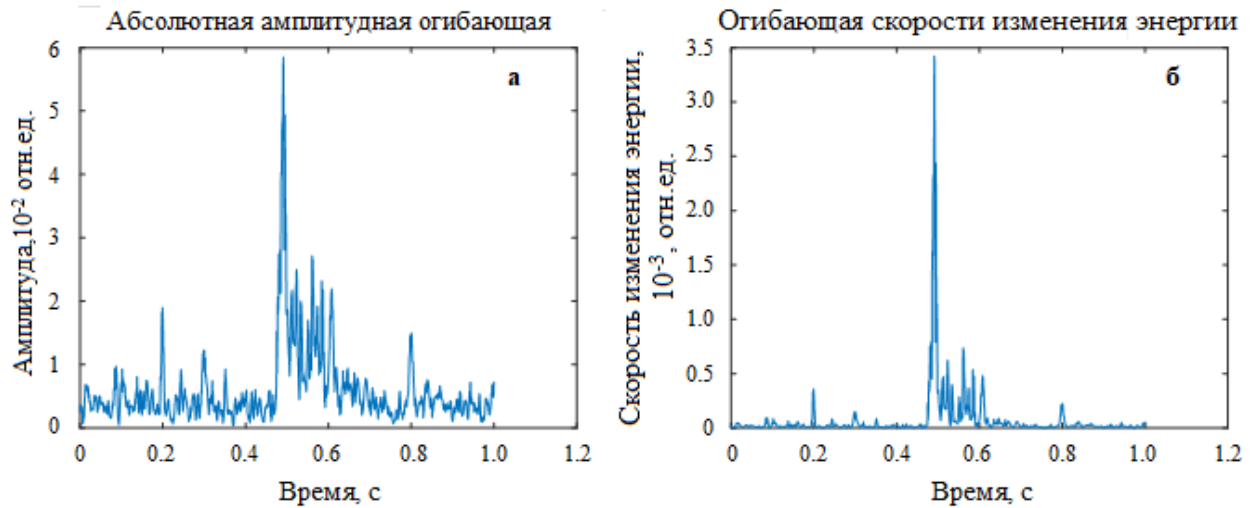


Рисунок 3.25 – Сигнал, обработанный алгоритмом шумоподавления (CEEDMAN+Wavelet): а) абсолютная амплитуда; б) скорость изменения энергии

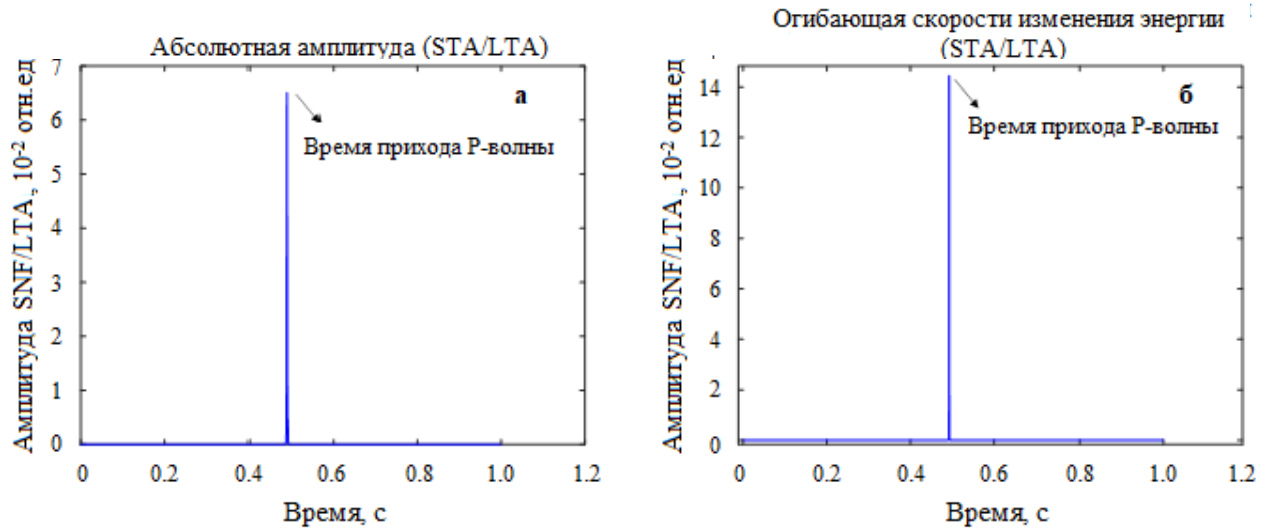


Рисунок 3.26 – Нормализованное преобразование STA/LTA сигнала на рисунке 4.17: А) абсолютная амплитуда; В) скорость изменения энергии

Из рисунка 3.25 видно, что импульсные сигналы длительностью 0,2 с, 0,3 с и 0,8 с эффективно подавляются. Однако результат преобразования нормализованного преобразования STA/LTA на рисунке 3.26 показывает, что время прихода Р-волны составляет 0,4910 с (результат на рисунке 3.22 - 0,4841 с), что указывает на то, что импульсный сигнал оказывает негативное влияние на алгоритм.

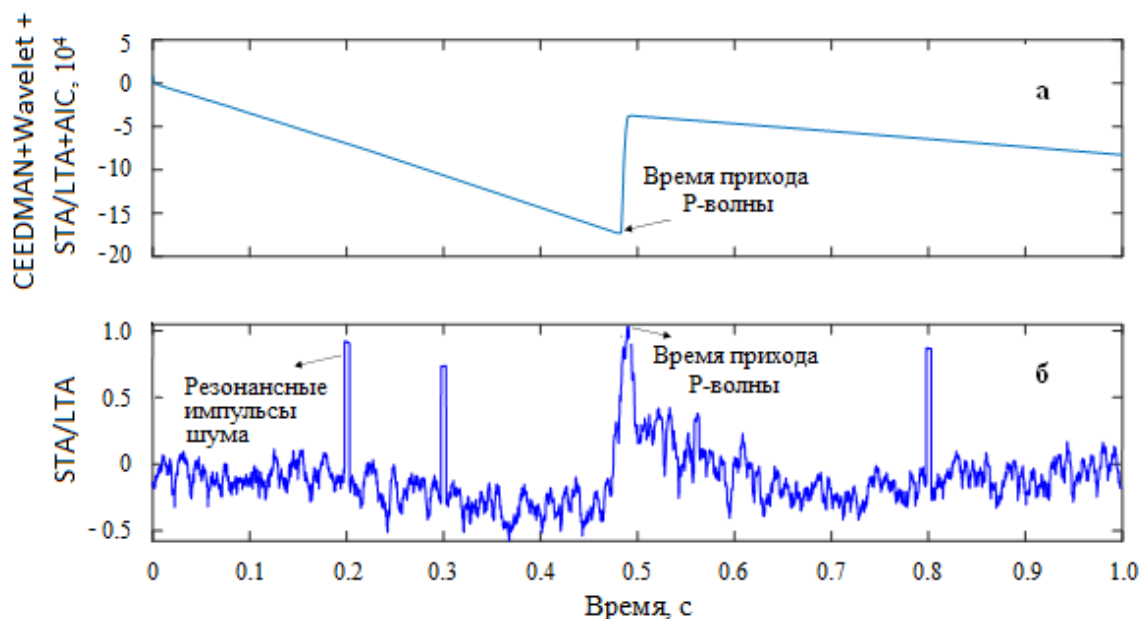


Рисунок 3.27 – Сравнение результатов использования CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA + AIC (абсолютная амплитуда) и традиционного преобразования STA/LTA для обработки данных: а) CEEDMAN + Wavelet + STA/LTA + AIC (абсолютная амплитуда); б) традиционное преобразование STA/LTA

Традиционная STA/LTA чувствительна к изменению амплитуды. По этой причине время прихода Р-волны не может быть определено этими методами. Как показано на рисунке 3.27, при использовании традиционного алгоритма STA/LTA ранний пик приходится на 0,2 с. Позиции, в которых возникают импульсные сигналы, вызывают большие амплитудные изменения отклика. Эти изменения отклика трудно устранить с точки зрения пороговой обработки, что приводит к ошибкам определения прихода Р-волны. Результат определения прихода Р-волны с использованием алгоритма CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA+AIC (абсолютная амплитуда) составляет 0,4827 с.

Как видно из таблицы 3.7 наибольшей точностью обладает алгоритм CEEMDAN + вейвлет + STA/LTA + AIC. Данные с импульсными помехами и белым шумом негативно влияют на автоматическое определение Р-волны. Однако при использовании абсолютной амплитуды в качестве входных данных результаты находятся в пределах 10 мс от ручного отбора, а 86,67 % результатов - в пределах 5 мс.

Таблица 3.7 – Анализ результатов определения времени прихода Р-волны в импульсах и сигналах помех с гауссовским белым шумом различными методами (Интервал отношения сигнал/шум после добавления гауссовского белого шума составляет [-14 дБ, -10 дБ])

Ошибка подбора (мс)	Гауссовские белые и импульсы. Лабораторные данные с добавлением шума		
	CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA	Скорость изменения энергии (CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA+AIC)	Абсолютная амплитуда(CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA+AIC)
(20,30]	13.33%	6.67%	
(10,20]	46.67%	20.00%	
(5,10]	40.00%	6.67%	13.33%
[0,5]		66.67%	86.67%

Это указывает на то, что метод подходит для определения времени прихода Р-волн сигналов акустической эмиссии трещин в диэлектрических материалах и горных породах. Метод, предложенный в данной работе, обладает относительно высокой помехоустойчивостью и точностью.

3.6 Физическая экспериментальная проверка алгоритма позиционирования

В этом разделе для тестирования предлагаемого алгоритма 3D-позиционирования используются три образца размером $(70 \times 70 \times 70)$ мм³. Два образца содержат дефекты в виде полостей, а один образец не имеет очевидных дефектов в виде полостей, как показано на рисунке 3.28.

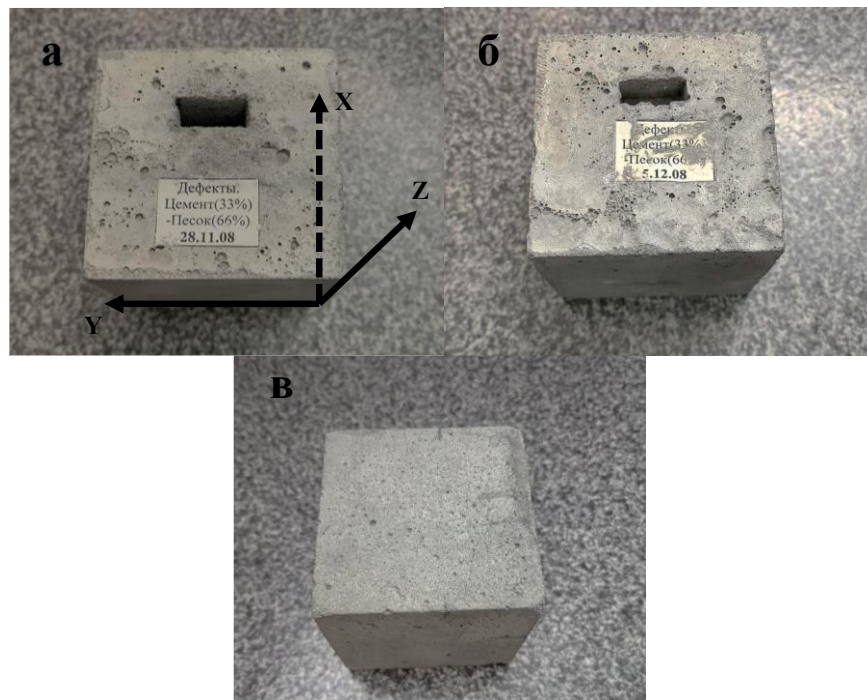


Рисунок 3.28 – Экспериментальный образец (состоящий из 33% цемента и 66% песка): а) с дефектом полости ($20 \times 10 \times 30$) мм³; б) с дефектом полости ($20 \times 10 \times 20$) мм³; в) отсутствие явных дефектов пустот



Рисунок 3.29 – Вид измерительной установки

Измерения образцов проводились с использованием измерительного прибора, представленного на рисунке 3.29. Металлические шарики применялись для непосредственного ударного воздействия на образцы, после чего осуществлялся сбор акустико-электрических сигналов, возникающих при каждом ударе. Полученные сигналы представлены на рисунке 3.30.

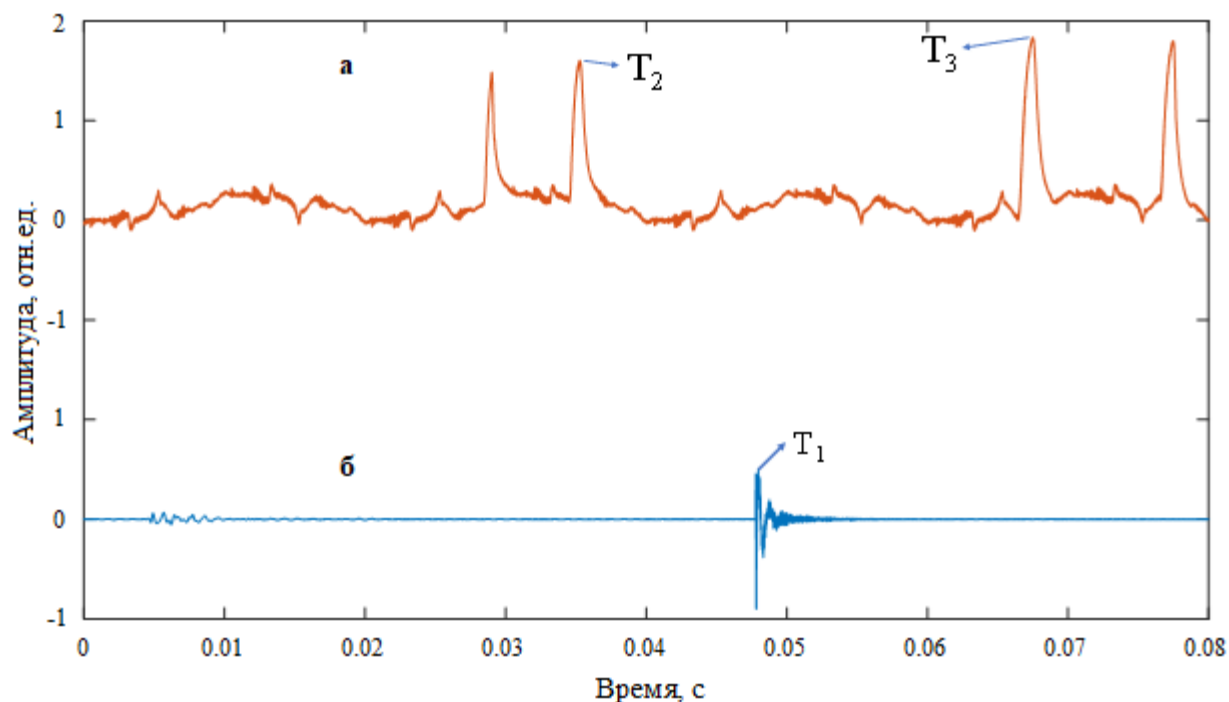


Рисунок 3.30 – Сигналы, регистрируемые датчиком в процессе измерений: а) - сигнал оптрона (красный цвет) для определения скорости налета и отскока шарика; б) - электромагнитный сигнал (синий цвет), возникающий при акустико-электрическом преобразовании.

При условии предположения об отсутствии потерь при ударе шара об образец и его движении в канале, абсолютные значения ускорения шара в канале равны. Это означает, что время движения шара от оптического датчика до образца равно времени возврата после удара. Однако в реальных условиях происходят передача части энергии удара в энергию возбуждаемого акустического импульса и энергетическими потерями, вызванные трением при неидеальном упругом взаимодействии шарика и подложки, что увеличивает время, необходимое для возврата шара к оптическому датчику.

Для упрощения расчётов в данной работе принято, что временные потери, вызванные энергетическими затратами при каждом соударении, остаются постоянными. Как следует из формулы 3.8, временные потери, вызванные энергетическими затратами при соударении, взаимно компенсируются в ходе вычислений. Следовательно, время прихода первого вступления сигнала на датчике может быть упрощено до следующего выражения:

$$T_p = \frac{(T_3 - T_2)}{2} + T_2 - T_1 \quad (3.61)$$

Подставив время прихода первой волны в формулу формулы 3.8, можно предсказать местоположение дефекта. Прогнозируемые результаты показаны в Таблице 3.8. Согласно материалам и модели на рисунке 3.28 проведено конечно-элементное имитационное моделирование. Результаты расчетов представлены в Таблице 3.9. Рисунок 3.31 представляет собой модель конечных элементов рисунка 3.28а.

Таблица 3.8 – Результаты расчета позиционирования на основе результатов физических экспериментов

Номер образца (на рисунке 3.28)	Прогнозируемое местоположение дефекта (мм)	Местоположение ситуации
а	(44.2833, 37.9151, 38.4050)	За пределами дефектной зоны
б	(24.0761, 27.3592, 52.7485)	За пределами дефектной зоны
В	(5.2110, 7.6316, -5.2901)	За пределами дефектной зоны

Таблица 3.9 – Результаты расчета позиционирования по результатам моделирования

Размер дефекта	Прогнозируемое местоположение дефекта (мм)	Местоположение ситуации
(20×10×30) мм ³	(50.1311, 31.9251, 53.4050)	в дефектной зоне
(20×10×20) мм ³	(52.2369, 32.0295, 66.9457)	в дефектной зоне

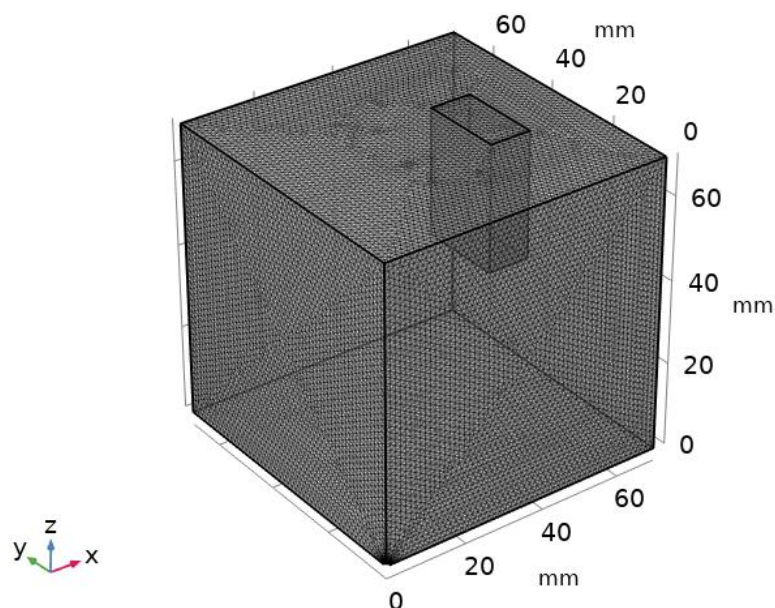


Рисунок 3.31 – Модель объемной гетерогенной структуры размером $(70 \times 70 \times 70) \text{ мм}^3$, содержащей 179804 конечных элементов.

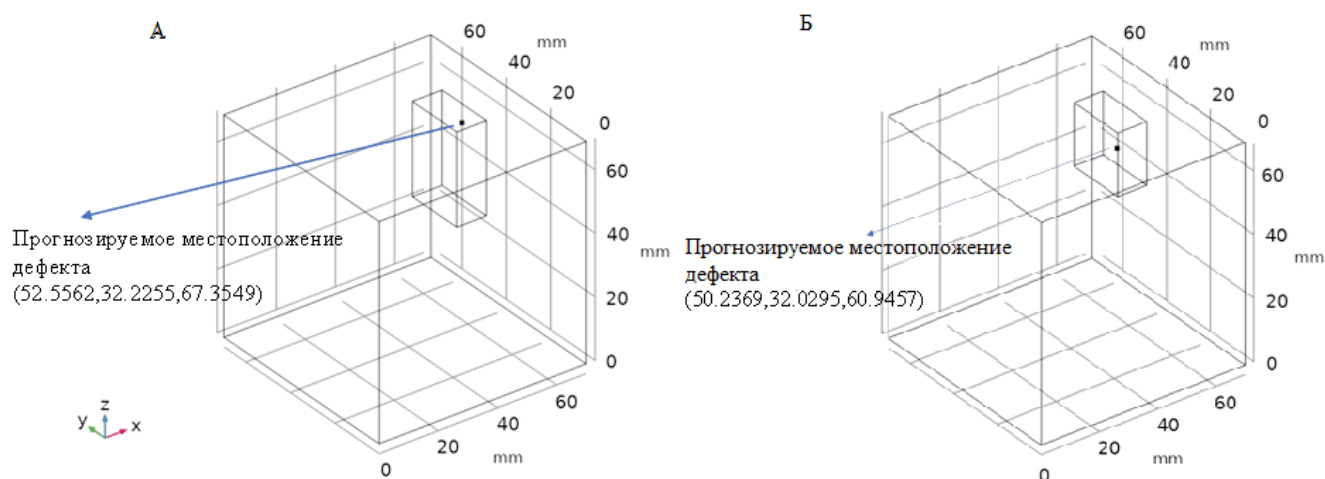


Рисунок 3.32 – Внутренний дефект и рассчитанное прогнозируемое местоположение точки: А - дефекты полости размером $(20 \times 10 \times 30) \text{ мм}^3$; Б - дефекты полости размером $(20 \times 10 \times 20) \text{ мм}^3$

Согласно данным Таблицы 3.8 и рисунка 3.33, все прогнозируемые дефекты расположены внутри образца. Однако для образца, показанного на рисунке 3.28В и 3.33В, прогнозируемый результат указывает на внешнюю поверхность, что соответствует отсутствию явных полостных дефектов в самом образце.

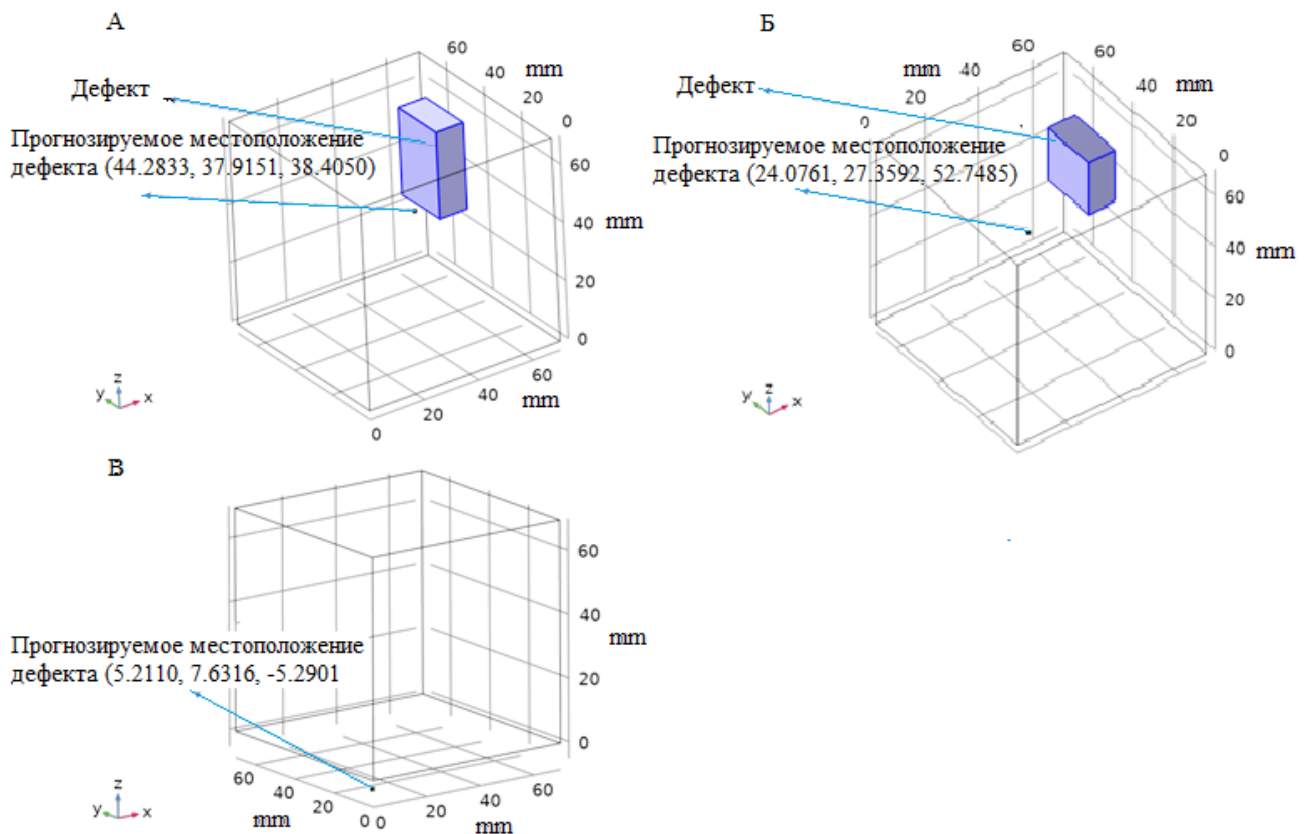


Рисунок 3.33 – Результаты эксперимента по 3D-позиционированию с использованием образцов на рисунке 3.28: А - дефекты полости размером (20×10×30) мм³; Б - дефекты полости размером (20×10×20) мм³; В - отсутствие явных дефектов в виде пустот.

При сравнении рисунка 3.33 с результатами, помещенными в Таблицу 3.9 видно, что результаты прогнозирования в физическом эксперименте удовлетворительны, но значительно хуже, чем в модели конечно-элементного моделирования. Это расхождение объясняется следующими факторами:

- Модель симуляции работает в идеальных условиях, где разница во времени прихода первой волны в каждой точке составляет всего около 0,05 мкс. В физическом эксперименте эта разница увеличивается до 5 мкс.
- Определение времени прихода первой волны в физических экспериментах сопровождается неизбежными погрешностями. Потери энергии при ударе шара по образцу вызывают временную задержку при прохождении через оптический датчик. Поскольку точные потери энергии не могут быть количественно определены, мы предполагаем постоянное время

задержки для каждого удара. Кроме того, небольшие погрешности в измерении точки удара шара по образцу могут привести к дополнительным ошибкам.

- Модель симуляции предполагает идеализированный материал с постоянной и равномерной скоростью звука. Однако реальные материалы обладают внутренней неоднородностью, что приводит к отклонениям в распространении волн.

- Алгоритм использует модель плоской волны для оценки расстояний. Однако в ближней зоне распространение волн подчиняется сферической модели, что вносит дополнительные неточности.

Выводы по главе 3

1. Предложен алгоритм шумоподавления CEEMDAN+Wavelet, коэффициент ранговой корреляции Спирмена применяется для выбора IMF разложения CEEMDAN, что может эффективно фильтровать высокочастотный шум помех. Эффективность алгоритма удаления шума проверяется с использованием сигналов акустической эмиссии с гауссовым белым шумом.

2. Результаты подбора времени первого прихода продольной волны методом CEEDMAN+Wavelet + STA/LTA+AIC для экспериментальных данных с добавлением гауссовского белого шума наиболее близки к результатам «ручного» подбора. Использование абсолютной амплитуды в качестве входных данных алгоритма является более точным, чем использование скорости изменения энергии.

3. CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA более точен, чем традиционный STA/LTA, и нет необходимости выбирать порог; пиком является время прихода Р-волны.

4. При использовании традиционного метода подбора STA/LTA можно добиться автоматического подбора в условиях интерференции гауссовского белого шума, но эффект несколько хуже, чем у CEEDMAN+Wavelet+STA/LTA+AIC.

5. Абсолютная амплитуда и скорость изменения энергии сигнала огибающей Гильберта

подставляются в расчет преобразования STA/LTA. Точность срабатывания может быть улучшена путем их перекрестной проверки друг с другом. Наконец, пиковые значения абсолютной амплитуда и скорости изменения энергии сигнала вычисляется с использованием функции `findpeaks` Matlab для определения времени прибытия Р-волны.

6. Построенная имитационная модель и расчеты, выполненные с ее помощью, демонстрируют эффективность метода трехмерной локации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования. Результаты моделирования показывают, что при математическом определении местоположение дефектов в твердых диэлектрических материалах в расчетные формулы трехмерного алгоритма позиционирования необходимо использование параметров детерминированных акустических импульсов возбуждения в интервальных точках воздействия и подстановки времени прибытия Р-волны полученного электромагнитного отклика от акустической.

7. Электрический отклик различных дефектных зон и мест их расположения рассчитывается на основе трехмерного моделирования образца при ударном возбуждении. Это облегчает оценку местоположения и размера дефектов на основе спектральных характеристик электромагнитного отклика.

8. Были выполнены трёхмерные расчёты локализации дефектов в виде пор в исследуемых образцах. Сравнительный анализ прогнозируемых положений дефектов с эталонными значениями координат их центров продемонстрировал удовлетворительную точность. Результаты показывают, что эффект прогнозирования является идеальным. Это доказывает осуществимость алгоритма в прогнозировании внутреннего положения дефекта тестового образца.

Результаты исследований Главы 3 опубликованы в статьях:

1. Junhua Luo. THREE-DIMENSIONAL POSITIONING OF INTERNAL VOLUMETRIC DEFECTS IN SOLID MATERIALS BASED ON ACOUSTIC-ELECTRIC TRANSFORMATIONS / Luo J., Bepalko A., Utsyn G. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2025. № 9. – С. 55-68.

2. Junhua Luo. Method for the P-wave arrival pickup of rock fracture acoustic emission signals under strong noise / Luo J., Bepal'ko A. A., Lu D., Li B. // Measurement Science and Technology. – 2024. – Т. 35, № 8. – С. 086102.

Приведенные результаты являются обоснованием 1 и 2 защищаемых положений диссертации.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

В данной главе представлены результаты двух основных частей:

1. Экспериментальные исследования параметров электромагнитных откликов на внешнее детерминированное акустическое возбуждение модельных образцов бездефектных и дефектных материалов, в том числе образцов композитов на основе цемента, в процессе нагружения ступенчатым сжатием и сдвигом. Внешнее детерминированное акустическое возбуждение повышает точность процесса развития разрушения. Результаты этих исследований важны для дальнейшего применения при контроле развития трещинообразования и разрушения бездефектных и дефектных материалов в условиях нагрузки.

2. Экспериментальные исследования электромагнитных откликов на внешнее акустическое воздействие двойных электрических слоев на основе контактов солевых растворов и образцов бездефектных и дефектных цементно-песчаных смесей (ЦПС). Рассматриваются водные солевые растворы с разными молярными массами.

3. Общим в этих исследованиях является возбуждение внешним детерминированным акустическим импульсом электромагнитных откликов на образующихся и имеющихся двойных электрических слоях.

4.1 Экспериментальные исследования параметров электромагнитных откликов на внешнее детерминированное акустическое возбуждение модельных образцов бездефектных и дефектных материалов при ступенчатом нагружении сжатием и сдвигом

Акустико-электрических преобразований (АЭП) в диэлектрических материалах происходят на двойных электрических слоях (ДЭС), возникновение которых обусловлено

присутствием в контролируемых материалах или изделиях электрически заряженных поверхностей, в том числе на бортах трещин или контактах дефектов разнообразной конфигурации с вмещающими диэлектрическими материалами [61-72]. Акустическое воздействие приводит к колебаниям двойных электрических слоев и, как следствие, к возникновению электромагнитных сигналов, спектр которых будет определяться параметрами воздействующего акустического импульса, характеристиками зарядового состояния ДЭС и структурой контролируемого диэлектрического материала [84-87]. В соответствие с прямым пьезоэлектрическим эффектом сегнетоэлектрические включения также являются источниками электромагнитных сигналов [88] при воздействии на них акустических импульсов. Это может влиять на распознавание присутствия дефектов по амплитуде, но не по частотным характеристикам, так как их частотные параметры неизменны при детерминированном акустическом воздействии. Присутствие дефектов будет изменять амплитуду и спектр электромагнитных сигналов. Одноосное сжатие или сдвиговые напряжения контролируемых материалов приводит к образованию трещин и их развитию при возрастании нагрузки. Это также увеличивает дефектность материала на всем протяжении нагружения до разрушения. Зарядовое состояние может меняться на контактах дефектов и вмещающих их материалов, в том числе на границах пустот, как показано в главе 3 настоящей работы, а также на бортах трещин при их образовании и развитии. Важно определить, как влияют изменения дефектности в процессе роста трещин на характеристики ЭМС. С этой целью очень результативным могут являться исследования параметров электромагнитных сигналов при комплексном внешнем детерминированном акустическом возбуждении в процессе ступенчатого нагружения сжатием или сдвигом до разрушения.

Для проведения таких комплексных исследований использовался стенд, блок-схема которого приведена на рисунке 2.2 Главы 2. Там же приведено описание работы стенда на одноосное сжатие, а также специальных держателей модельных образцов для создания

сдвиговых напряжений в образцах при одноосном нагружении. На этом же стенде при нагружениях сжатием или сдвигом осуществлялось внешнее детерминированное акустическое возбуждение образцов ударом шарика, который разгонялся с помощью пружинного устройства.

Для проведения комплексных акустоэлектрических испытаний на развитие разрушения и обнаружение трещин в модельных экспериментах последовательно использовались образцы горных пород размером в диаметре 42 ± 1.0 мм и высотой 80 ± 1.5 мм, а также образцы из отвержденной цементно-песчаной смеси (ЦПС) размерами $(100 \times 100 \times 100)$ мм³. Использовались образцы ЦПС и других размеров, которые будут приводиться при описаниях результатов исследований.

На рисунке 4.1 показаны схема поэтапного возбуждения акустического импульса в образце ЦПС и регистрация электромагнитных сигналов из него при испытании образцов из ЦПС, разделенного на площадки. Ширина площадок на образце для измерения ЭМС определялась размером лепестка ёмкостного датчика электромагнитного приёмника.

Акустический импульс (АИ), вводимый в образец, имел колоколообразную форму с длительностью на полувывоте 35–50 мкс, в зависимости от веса ударного шарика. Как показано на рисунке 4.1бв, при испытании модельного образца ЦПС амплитуда электромагнитного оклики на внешнее возбуждение АИ в области трещины более высокая. Частота ЭМС в присутствии трещины будет отличаться от ЭМС целого бездефектного образца, что будет показано ниже по тексту.

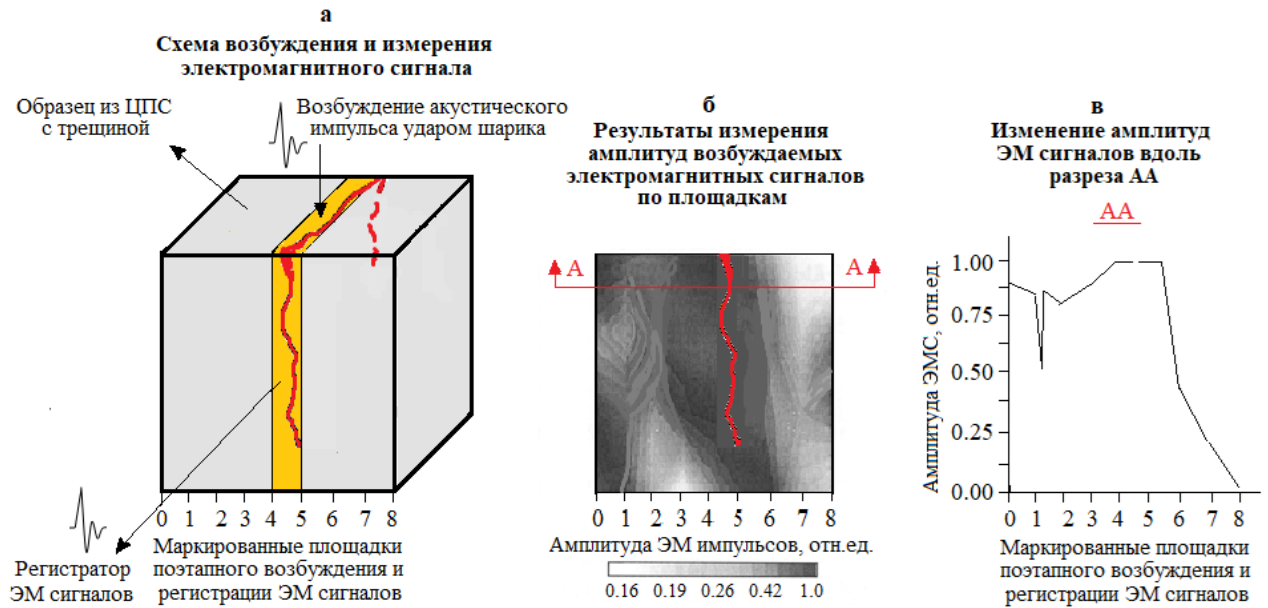


Рисунок 4.1 – Схема детерминированного возбуждения акустического импульса и регистрации электромагнитного отклика в образце цементно-песчаной смеси ($100 \times 100 \times 100$) мм³ с трещиной (а); пример результатов мониторинга амплитуды параметров электромагнитных откликов вокруг трещины (б,в)

Для сравнения с мониторингом методом механико-электрических преобразований (МЭП), когда наблюдается последовательность ЭМС в процессе образования и роста трещин при развитии разрушения образцов, были проведены экспериментальные исследования для выявления возможностей контроля развития разрушения внешним акустическим детерминированным акустическим импульсом в процессе их нагружения сжатием или сдвигом. При этом на прессе производили ступенчатое нагружение сжимающими напряжениями. Возбуждение нагружаемых образцов с помощью АИ сопровождается процессом акустико-электромагнитных преобразований (АЭП) и генерацией электромагнитного отклика на всем периоде нагружения до разрушения.

Первоначально исследования АЭП при одноосном сжатии проводили на образцах магнетитовой руды с содержанием 25% кальцита. На рисунке 4.2а показан график одноосного «ступенчатого» нагружения сжатием до разрушения образца. На этом рисунке показано нарастание величин ступенчатого сжимающего нагружения образца во времени, где стрелками

указано внешнее детерминированное акустическое возбуждение. Измерение электромагнитного отклика (ЭМО) на внешнее детерминированное акустическое воздействие образца производили до 10 раз на каждой «ступеньке». На рисунке 4.2б приведена типичная зависимость усредненных максимальных амплитуд ЭМО. На рисунке 4.2б видно, что 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.

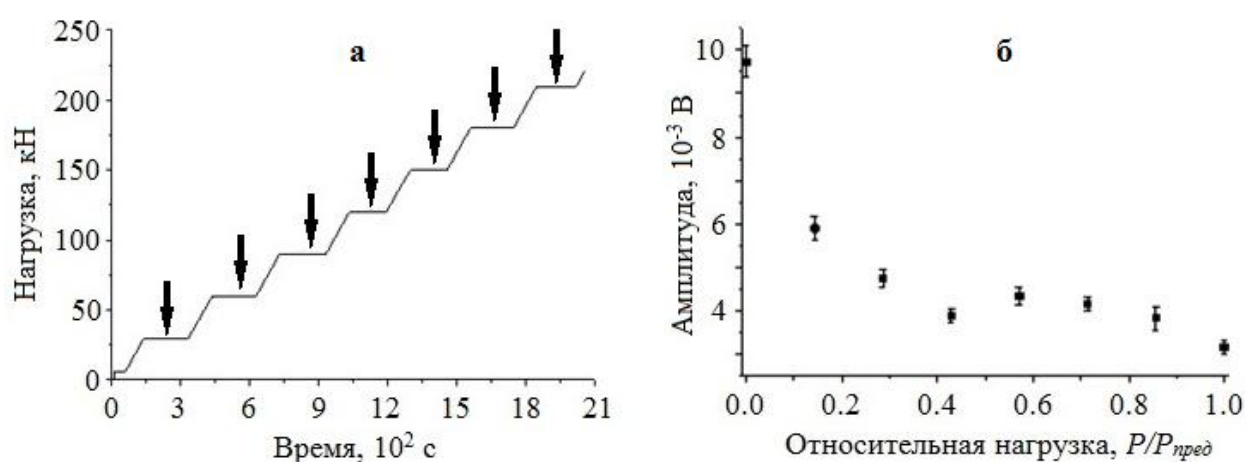


Рисунок 4.2 – График изменения во времени «ступенчатого» нагружения сжатием до разрушения образца, где стрелками указано внешнее возбуждение внешними детерминированными акустическими импульсами (а), и закономерность изменения усредненных амплитуды ЭМС образцов магнетитовой руды при ступенчатом одноосном нагружении и внешнем акустическом возбуждении (б)

На рисунке 4.3б показаны изменения амплитуды ЭМС при детерминированном акустическом возбуждении образцов магнетитовой руды в процессе одноосного сдвига, где $P_{пред}$ – предельная разрушающая нагрузка.

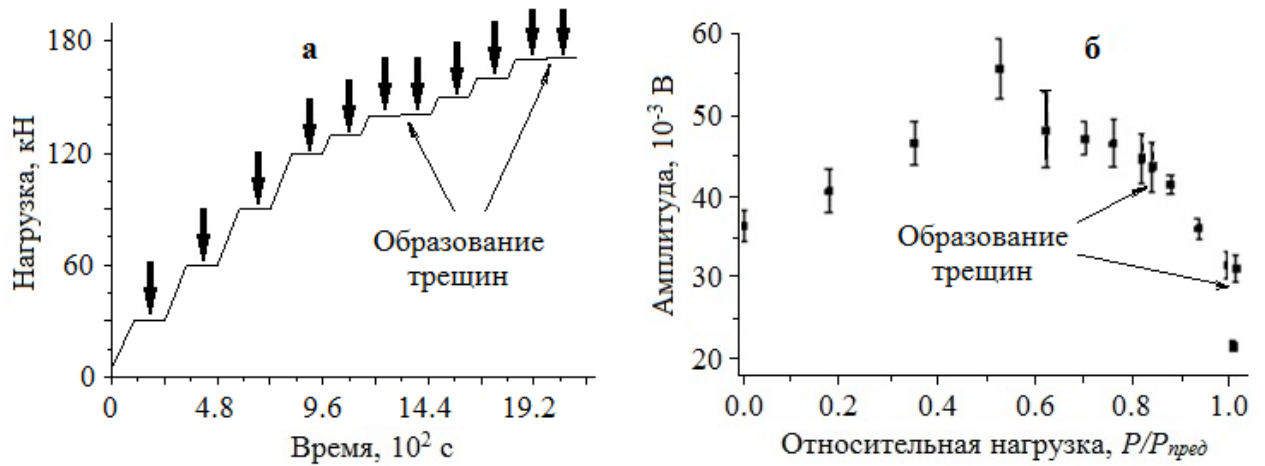


Рисунок 4.3 – Ступенчатое сдвиговое нагружение образца магнетитовой руды: а - нарастание величин ступенчатого нагружения образца во времени, где стрелками указано внешнее детерминированное акустическое возбуждение; б - изменения амплитуды электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом возбуждении образцов магнетитовой руды в процессе одноосного сдвига, где $P_{пред}$ – предельная разрушающая нагрузка

Здесь изменения амплитуды ЭМС носят другой характер, чем при сжатии (рисунок 4.2б). Здесь амплитуда электромагнитного отклика на внешнее детерминированное акустическое возбуждение начинает нарастать от $(0.2-0.5) P_{пред}$ от разрушающих сжимающих усилий. Такой характер развития разрушения возможен при использовании геометрии создания сдвиговых напряжений в образцах, приведенной на рисунке 2.2 Глава 2. Более того, по характерному потрескиванию и графику изменения напряжений в процессе ступенчатого нагружения (рисунок 4.2а) было определено время возникновения разрушающих образец трещин. В районе $(0.55-0.8) P_{пред}$ наблюдалась не стационарность амплитуды ЭМС и ее небольшой спад. На участке $(0.8-1.0) P_{пред}$ происходит развитие разрушения образца. В дальнейшем исследовались образцы ЦПС с дефектами. На рисунке 4.4 приведены спектры электромагнитных откликов на детерминированное акустическое возбуждение модельного образца ЦПС с дефектом из магнетитовой руды при ступенчатых сдвиговых нагрузках.

На рисунке 4.4а показан спектр электромагнитного отклика образца при внешнем импульсном акустическом воздействии в отсутствии любых нагрузок. На рисунке 4.4б

представлен спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 60 кН, а на рисунке 4.4в показан спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 120 кН. На рисунке 4.4а и рисунке 4.4б показано, что в спектре включены дополнительные высокочастотные и низкочастотные составляющие ЭМО. Такие изменения соответствуют развитию зоны деструкции образца. При сдвиговых нагружениях, предшествующих разрушению, спектр ЭМО полностью сдвинулся в низкочастотную область (рисунок 4.4г), что соответствует образованию трещин отрыва и полному разрушению образца.

Таким образом, спектры ЭМО при внешнем детерминированном импульсном акустическом возбуждении также служат хорошим ориентиром для определения стадии подготовки разрушения образцов, в том числе содержащих дефекты.

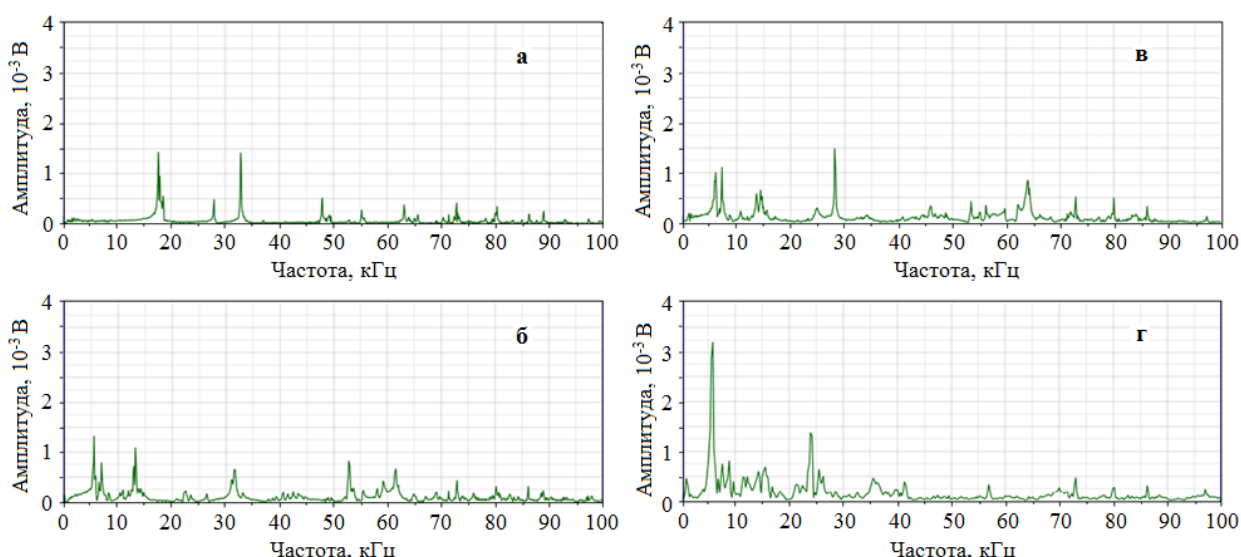


Рисунок 4.4 – Спектры электромагнитных откликов на детерминированное акустическое возбуждение образца с дефектом из магнетитовой руды при ступенчатом сдвиговом нагружении: а – без сдвиговой нагрузки; б – сдвиговое нагружение 60 кН; в – сдвиговое нагружение 120 кН; г – сдвиговое нагружение 170 кН (предразрушение)

Детальное исследование закономерностей изменения прочности производили на образцах из цементно-песчаной смеси ($100 \times 100 \times 100$) мм³ с дефектами разных размеров из магнетитовой руды с 80% содержанием магнетита. На рисунок 4.5 приведены закономерности изменения усредненных амплитуд электромагнитных откликов образцов ЦПС с дефектом из магнетитовой

руды разной толщины при ступенчатом нагружении одноосным сжатием до разрушения и возбуждения на этих ступеньках около 10 раз внешними детерминированными акустическими импульсами. Акустические импульсы возбуждения по полуширине имели длительность 25-30 мкс.

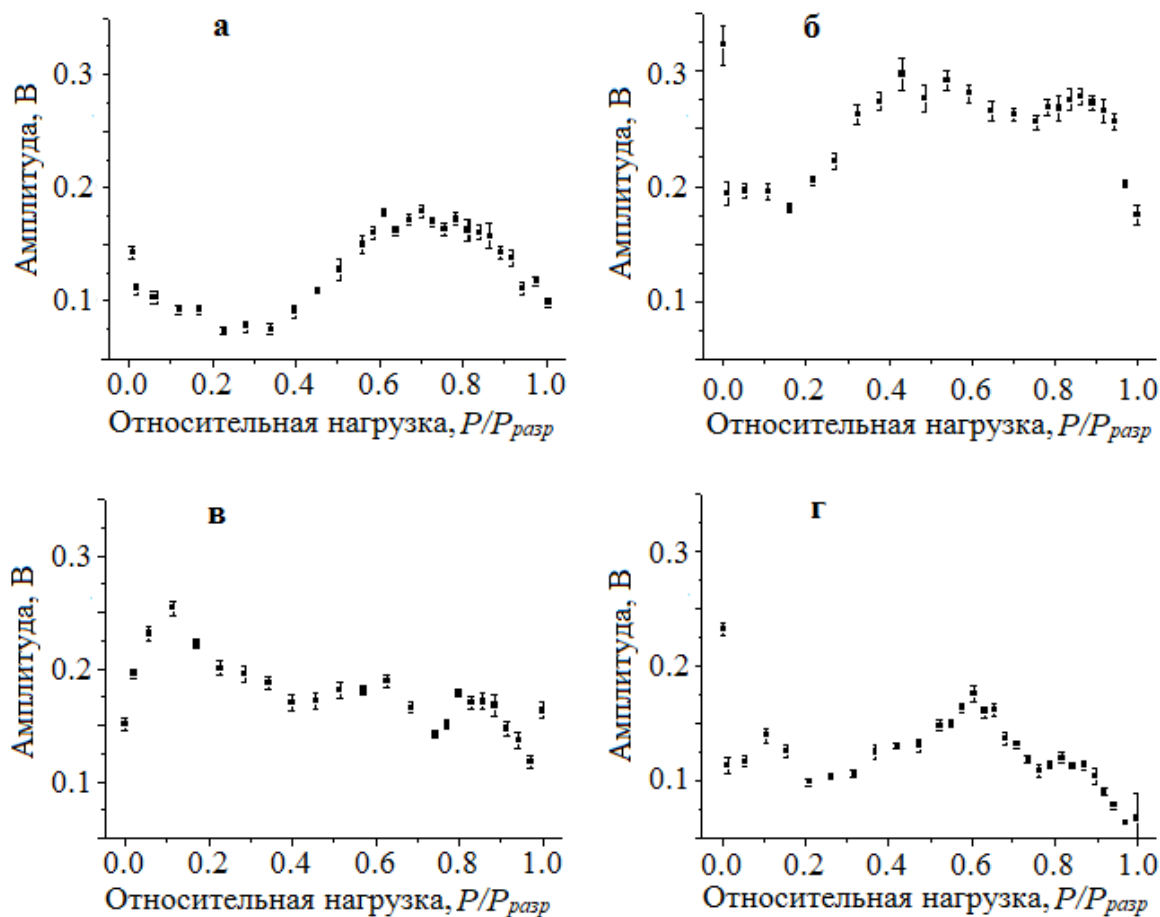


Рисунок 4.5 – Закономерности изменения усредненных параметров электромагнитных откликов модельных образцов из цементно-песчаной смеси размером $(100 \times 100 \times 100)$ мм³ с дефектами из магнетитовой руды разной толщины на внешнее возбуждение акустическими импульсами при ступенчатом нагружении одноосным сжатием до разрушения. Возбуждение и распространение акустического импульса перпендикулярно поверхности дефекта толщиной: а - 5 мм; б - 10 мм; в - 30 мм; г - 40 мм

Прочность образцов $P_{разр}$ отличалась в пределах $\pm 3\%$ и составила для образцов с дефектами толщиной: 0.5 мм – 370 кН; 10 мм – 360 кН; 20 мм – 352 кН; 40 мм – 346 кН. На рисунках 3.5а,б,в,г видно, что при зондировании таких образцов внешним акустическим

импульсом этапы развития разрушения наблюдаются для всех образцов – это процесс уплотнения образца при сжатии, образование и развитие зоны деструкции и развитие разрушающих трещин. На рисунке 4.5 не совсем четко выделяется только этап устойчивой прочности. Для образца с дефектом толщиной 5 мм закономерность изменения параметров ЭМО практически совпадает со значениями откликов из бездефектного образца.

Используемые в экспериментах материалы существенно отличаются по акустическому импедансу, который определяли как $z = \rho c$, где ρ – плотность материала, c – скорости звука. Так акустический импеданс магнетитовой руды $z_{mr} = 28.51 \times 10^6$ кг/с·м² значительно больше акустического импеданса CSM $z_{unc} = 5.25 \times 10^6$ кг/с·м². В соответствие с расчетами по формуле Релея коэффициент прохождения акустического импульса из ЦПС в дефект из магнетитовой руды соответствует величине 0.52. Это может обуславливать пониженную амплитуду колебания зарядового состояния на контакте основного вещества модельного образца и дефекта из магнетитовой руды. В результате в экспериментах при внешнем акустическом возбуждении образца наблюдалась и пониженная амплитуда ЭМС.

Для сравнения на рисунке 4.6 приведены графики изменения десяти усредненных амплитуд ЭМС, на каждой точке на графиках, из образцов ЦПС с дефектами из фторопласта. Образцы изготавливали размером $(50 \times 50 \times 100)$ мм³, а дефекты из фторопласта имели размеры $(10 \times 10 \times 15)$ мм³, $(20 \times 20 \times 30)$ мм³ и $(15 \times 15 \times 23)$ мм³. При изготовлении дефекты размещались в середине образцов. Причем дефект размещали так, чтобы наибольший его продольный размер совпадал с осью образца, соответствующей 100 мм. Акустический импульс вводился через площадку (50×50) мм. Акустический импеданс фторопласта ниже, чем у ЦПС, и соответствовал значению $z_{fn} = 2.95 \times 10^6$ кг/с·м². Расчет коэффициента прохождения акустического импульса из ЦПС во фторопластовый дефект имеет величину 0.92. Это указывает на то, что колебания зарядового состояния на контакте этих материалов будут более интенсивными.

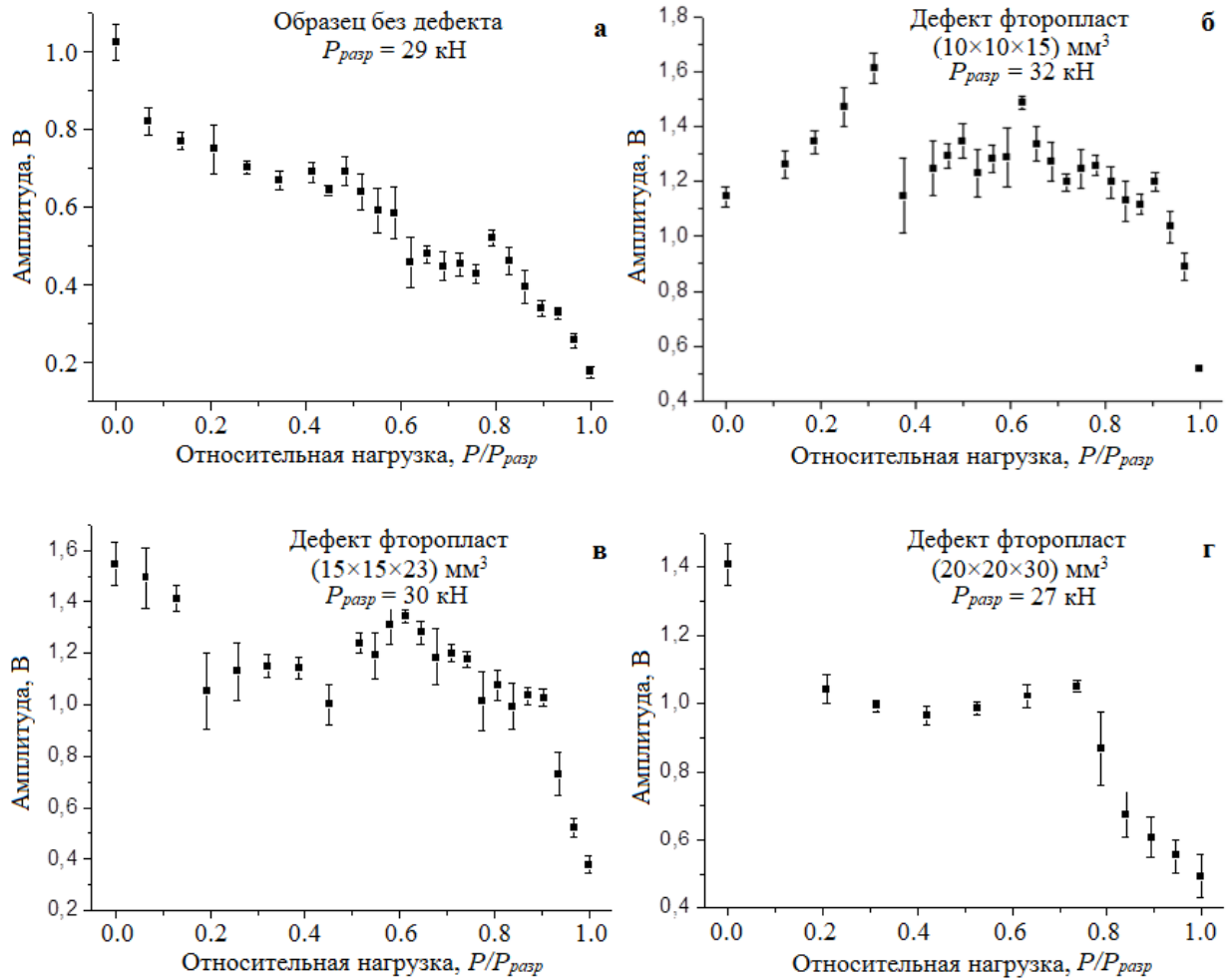


Рисунок 4.6 – Закономерности изменения усредненной амплитуды электромагнитных откликов модельных образцов из цементно-песчаной смеси размером (50×50×100) мм³ с дефектами из фторопласта на внешнее возбуждение акустическими импульсами при ступенчатом нагружении одноосным сжатием до разрушения.

При этом амплитуда ЭМО на внешнее акустическое возбуждение модельного образца со фторопластовым дефектом будет выше, чем у образца из ЦПС с дефектом из магнетитовой руды. Такое увеличение амплитуд ЭМО видно из сравнения рисунка 4.5 и рисунке 4.6. На бездефектном образце ЦСМ (рисунок 4.6а) деструктивная зона не очень явно выделяется в районе нагрузки (0.4-0.8) $P_{разр}$. На рисунке 4.6б и рисунке 4.6в зона развития трещинообразования имеет явный вид. На рисунке 3.6г вид развития зоны деструкции отличается. Такое отличие, вероятно, связано с изменением резонансных характеристик акустического импульса возбуждения и существенно увеличенного продольного размера дефекта.

Для проверки влияния резонансных длительности возбуждающего детерминированного АИ и продольного размера дефекта использовали образец ЦПС размером $(50 \times 50 \times 100)$ мм³ с прямоугольным дефектом из магнетитовой руды величиной $(15 \times 15 \times 23)$ мм³. Длительность АИ, вводимых через грань образца ЦПС площадью (50×50) мм² с помощью пьезоэлектрического излучателя, регулировалась импульсным высоковольтным генератором, напряжение от которого подавалось на контакты апериодического датчика [114]. Использовали акустические импульсы длительностью $(1.0, 5.0 \text{ и } 10.0) \times 10^{-6}$ секунд (рисунок 4.7).

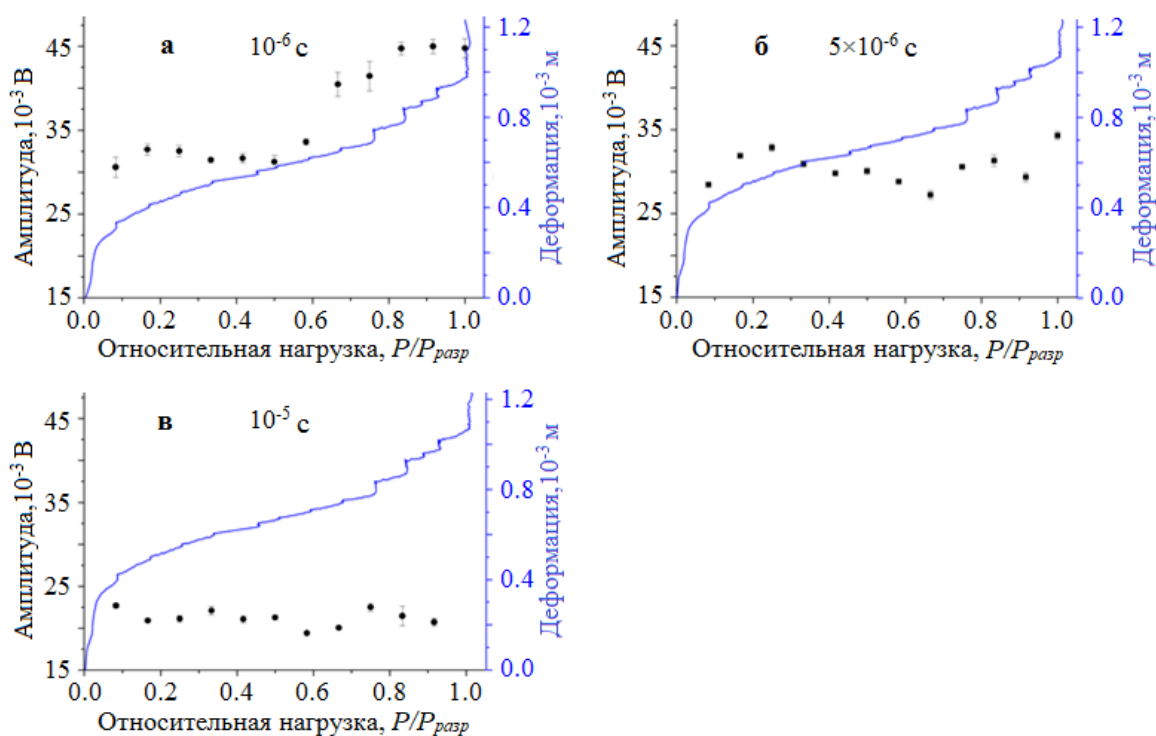


Рисунок 4.7 – Изменения амплитуды электромагнитных откликов на детерминированное акустическое возбуждение при ступенчатом нагружении сжатием модельного образца размером $(50 \times 50 \times 100)$ мм³ из цементно-песчаной смеси (акустический импеданс $Z_{см} = 5.25 \times 10^6$ кг/с·м²) с прямоугольным дефектом из магнетитовой руды (акустический импеданс $Z_{мм} = 24.34 \times 10^6$ кг/с·м²) размером $(15 \times 15 \times 23)$ мм³.

Площадь контакта пьезоэлектрического излучателя составляла 300 мм², которая была соосна длине образца и дефекта. Величина импульсов напряжения на пьезоэлектрическом излучателе составляла 800 В. При ступенчатом нагружении сжатием модельного образца в

зависимости от длительности возбуждающего ЭМО внешнего акустического импульса на рисунках 4.7а,б,в отчетливо наблюдаются изменения амплитуды ЭМС. На рисунке 4.7б. приведены данные, соответствующие наиболее оптимальным соотношением продольного размера дефекта и длительности зондирующего АИ с точки зрения выделения этапов развития разрушения образца в процессе ступенчатого нагружения по амплитудам ЭМО. Экспериментально полученные закономерности на рисунке 4.7 подтверждают предположение о влиянии длительности возбуждающего акустического импульса на параметры электромагнитного отклика.

Выводы по разделу 4.1 Главы 4

Таким образом, в разделе 4.1 приведены экспериментальные исследования электромагнитных откликов при комплексном нагружении модельных образцов сжатием или сдвиговыми напряжениями с применением внешнего импульсного детерминированного возбуждения акустическими импульсами на разных ступенях нагружения. В экспериментах для исследования акустико-электрических преобразований использовались модельные образцы из магнетитовой горной породы, бездефектные и дефектные образцы цементно-песчаной смеси, включающие дефекты из магнетитовой руды и фторопласта. Результаты этих исследований хорошо согласуются при образовании трещин и развитии деструктивных зон в процессе силового нагружения сжатием, а также при нагружении сдвиговым напряжением до разрушения образцов.

- По результатам экспериментальных исследований показано, что при внешнем импульсном детерминированном акустическом возбуждении тестируемых образцов удовлетворительно отслеживаются образование и развитие деструкции, в том числе в дефектных материалах. При этом электромагнитные отклики на зондирующие АИ при постоянных значениях прикладываемых напряжений (ступенях) в процессе одноосного сжатия или сдвига существенно отличаются друг от друга по амплитуде и виду, но ход изменения амплитуд ЭМО

отчетливо выделяет начало возникновения деструктивных процессов и ее развитие. При этом деструктивные процессы при сжатии и сдвиге имеют разные закономерности. Такое различие обусловлено тем, что при сжатии процесс разрушения развивается в объеме всего образца. В этом случае выделяются этапы уплотнения, формирования очага разрушения или деструкции, устойчивой прочности, предшествующий разрушению и прорастания трещин отрыва. При сдвиговых напряжениях, созданных так, как показано на рисунке 2.2б, процесс разрушения большей частью развивается в краевых частях образца. Этим обусловлено отличие параметров ЭМО при нагружении сжимающими и сдвиговыми напряжениями в процессе развития разрушения образцов при их внешнем детерминированном акустическом возбуждении. Поэтому при нагружении образцов сдвиговыми напряжениями в используемой конфигурации этап устойчивой прочности выделить затруднительно.

- Исследования ЭМО бездефектных и дефектных образцов из ЦСМ при возбуждаемого внешним акустическим импульсом в процессе нагружения сжатием показали влияние акустического импеданса дефектов и вмещающего материала, в нашем случае ЦПС. Выявлено, что соотношение их импеданса оказывает существенное влияние на амплитуду ЭМО, возбуждаемого внешним АИ. Очевидно, что при возникновении акустических импульсов в процессе образования и развития трещин также надо учитывать влияние акустического импеданса основного материала и дефекта.

- Моделирование на образцах ЦПС с дефектом из магнетитовой руды показало, что по спектрам электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении можно достоверно осуществлять контроль образования трещин и развития деструкции в процессе нагружения различными видами напряжений. В этом случае на этапе образования и развития зоны деструкции материала спектр регистрируемого ЭМО существенно расширяется как в низкочастотную, так и высокочастотную его область. Такое расширение спектра ЭМО с большой вероятностью связано с размерами возникающих трещин при развитии

зоны разрушения образца. В результате исследований спектра ЭМО показано, что по виду амплитудно-частотного спектра при акустическом возбуждении появляется возможность определять размер возникающих трещин в процессе развития разрушения в образцах не зависимо от вида силового нагружения.

- Экспериментальные исследования ЭМО модельных образцов ЦПС с дефектом показали, что при длительности внешнего акустического возбуждения близкой к продольному размеру дефекта будут наблюдаться резонансные проявления. Такие резонансные проявления будут оказывать существенное влияние на изменения закономерностей ЭМО в зонах образования и развития деструкции. Поэтому для надежного контроля дефектности необходимо использовать разные длительности акустического импульса при внешнем возбуждении в процессе нагружения образца или изделия какой-либо нагрузкой. Такой порядок тестирования обеспечит более надежный контроль развития разрушения.

Исследования, приведенные в настоящем разделе, показали, что использование комплексных методов механико-электрических и акустико-электрических преобразований при силовом нагружении сжатием или сдвигом будет полезным при тестировании и контроле процессов начала трещинообразования и развитии процессов разрушения в твердотельных диэлектрических материалах. В дальнейшем, рассмотренный комплексный метод тестирования развития разрушения диэлектрических образцов при любой эксплуатационной нагрузке может быть использован для обнаружения любых дефектов в таких материалах или изделиях.

Результаты исследований в подразделе 4.1 Главы 4 опубликованы в статьях:

1. Junhua Luo. Особенности акустико-электрических методов мониторинга разрушения твердых диэлектриков / Беспалько А.А., Данн Д.Д., Ло Ц., Федотов П.И. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, No. 3. С. 352–364. Doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.008.

2. Junhua Luo. Численное и экспериментальное моделирование акустико-электрического

метода неразрушающего контроля твердых диэлектриков / Беспалько А. В., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц. // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 320-334. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4- 320-334.

Приведенные результаты являются обоснованием 3 защищаемого положения диссертации.

4.2 Акустоэлектрические преобразования в твердом диэлектрике, контактирующем с солевыми растворами

Исследования, приведенные в этом разделе важны для контроля концентрации солевых растворов при разработке нефтяных, газовых и других месторождений, а также подземных вод, озер, оросительных каналов и других источников водоснабжения. В работе [115] Казанцева и Мищенко приведены исследования, указывающие на то, что солевые и ионные водные растворы всегда присутствуют при разработке газовых и нефтяных месторождений. В работах [115, 116] приведены данные, что в водных растворах в значительных концентрациях наблюдаются анионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- и катионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . В существенно меньших количествах присутствуют и другие ионы. В пресных водах среди катионов обычно преобладают кальций, а среди анионов - гидрокарбонаты. В рассолах в большей степени преимущественно содержатся хлориды кальция и натрия, а соленых водах - хлориды и сульфаты [115]. Водные солевые растворы присутствуют также в рудниках и угольных шахтах. Присутствие воды и водных растворов солей в нефти, особенно хлористых, приводит в результате нагрева при бурении к сильной коррозии оборудования нефтеперерабатывающих установок [115], а в рудниках и шахтах - проходческого оборудования, металлических и железобетонных тубингов и других элементов крепления [117]. При эксплуатации нефтяных скважин и шахтного оборудования происходит процесс отложения солей. Контакт оборудования с этими отложениями снижает эксплуатационные и экономические показатели и, как следствие, увеличивается стоимость добываемых полезных ископаемых.

Для прогнозирования отложения солей в скважинах и на оборудовании необходимо

постоянно изучать динамику состава применяемой в производственном процессе воды [115, 118].

С целью исключения побочных вредных для здоровья людей солевых включений и их концентрации необходим такой же контроль солей в лечебных озерах и на других водных лечебницах [119].

Мониторинг концентрации солей в воде должен проводиться непрерывно. В настоящее время для контроля солености вод используют разнообразные химические и физические методы контроля [120]. В работе [121, 122] авторы использовали электромагнитные методы в микро- и терагерцовом диапазонах для определения солености поверхности океанов, а также влажности материалов. Авторы проводили электромагнитные зондирования и прием их отражения от объектов контроля. В Томском политехническом университете проводились исследования изменения амплитуд электромагнитных откликов (ЭМО) при внешнем детерминированном воздействии на образцы горных пород с различной пористостью и влажностью в отсутствии контакта с солевыми растворами [123], а в работах [124] сделана попытка оценки минерализации солевых растворов $NaCl$, находящихся в непосредственном контакте с образцами горных пород. В экспериментах использовали процесс акустико-электрических преобразований на двойных электрических слоях, образованных солевыми растворами и горными породами, при внешнем возбуждении детерминированными акустическими импульсами. Полученные предварительные результаты исследований показали правильность выбранного направления определения солевых растворов и их концентраций. Далее Zhang G. с соавторами [125] исследовал формы электромагнитных импульсов при акустико-электрических преобразованиях на границе раздела фаз в скважинах, заполненных жидкостью. Здесь также получены положительные результаты по изменению солености вод. А для контроля инфузии воды в пластах, подверженных выбросам горных пород в угольных шахтах, Frid в своей статье предлагал использовать электромагнитное излучение [126].

Таким образом, развитие метода импульсных акустико-электрических преобразований для

контроля количественного содержания хлоридов и других солей в водных растворах является актуальным для нефтедобывающей, рудной и угольной промышленности. Во всех добывающих отраслях имеются различные горные породы, используются металлы, диэлектрические материалы, цементно-песчаные растворы и бетоны.

Вначале исследований импульсного применимости акустико-электрического метода была поставлена задача определения основных закономерностей изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных откликов при внешнем импульсном детерминированном воздействии на двойные электрические слои, образованные на контакте солевых растворов и твердотельных образцов цементно-песчаной смеси. Предполагалось апробировать такую конфигурацию исследований для контроля дефектности образцов ЦПС с дефектами из углеродистой стали и оргстекла, имеющих существенное различие в акустическом импедансе и проводимости.

В соответствие с поставленной задачей, для исследования двойных электрических слоев (ДЭС) на контактах солевых растворов с твердотельными диэлектриками были использованы образцы ЦПС с размерами $(50 \times 50 \times 100)$ мм³, в том числе с модельными твердотельными дефектами в них. Характеристики ЦПС и используемых материалов для дефектов приведены в Таблице 2.1. В экспериментах применяли водные растворы солей $NaCl$, NaI и $CaCl_2$. Молекулы этих солей имеют существенно различающиеся молярные массы: $NaCl$ - 58.5 г/моль, NaI - 150 г/моль и $CaCl_2$ - 111 г/моль. Если соли $NaCl$ и NaI с большой разницей отличаются молярными массами анионов, то в солях $NaCl$ и $CaCl_2$ уже катионы существенно отличаются молярную массой.

При проведении исследований и выявления закономерностей распределения ЭМО при внешнем возбуждении бездефектных и дефектных образцов ЦПС детерминированным АИ использовались водные растворы этих солей разной концентрации. При проведении экспериментальных исследований использовали метод акустико-электрических преобразований

(АЭП), в котором бесконтактно осуществляли регистрацию электромагнитных сигналов с последующим их спектральным анализом при внешнем контактном детерминированном импульсном акустическом возбуждении. Использовались также методы определения проводимости солевых растворов и весового контроля.

На рисунке 2.3а Главы 2, а также в статье [127], показана схема расположения образца ЦПС в емкости с водным раствором солей. Погружалась нижняя грань образцов ЦПС (100×50) мм² на глубину не более 4-5 мм. Датчик приема электромагнитных откликов на внешнее импульсное акустическое возбуждение располагали вблизи перпендикулярной плоскости образца такого же размера. Регистрация ЭМО проводилась с помощью емкостного дифференциального датчика. Возбуждение внешним акустическим импульсом производили по большей или меньшей грани образца с помощью удара шариком. Форма АИ при возбуждении ударом шарика близка к распределению Гаусса, а его длительность по основанию составляла 50×10^{-6} секунд. При этом возбуждение детерминированными АИ в основном производили по грани торцевой поверхности образца размером (50×50) мм². На рисунке 2.3а показана разметка по площадкам S_i для последовательной регистрации ЭМО. На рисунке 2.3б приведена блок-схема экспериментальной установки для возбуждения детерминированными АИ электромагнитных сигналов от контакта материала образца с солевым раствором [99]. Все операции возбуждения детерминированного АИ, измерения ЭМС и обработки результатов их измерения аналогичны методике, блок-схема которой приведена на рисунке 2.1 Главы 2. Сбор регистрируемых АИ и ЭМО сигналов осуществляли платой сбора данных BNC-2120, которая также обеспечивала передачу этих данных на компьютер для дальнейшего анализа. Под рисунком 2.1 приведены комментарии по использованию этой методики. Для измерения проводимости солевых растворов использовали стандартный анализатор жидкости «Анион 7053». При проведении исследований учитывали пористость используемых материалов. Так коэффициент пористости для образцов из ЦПС имеет значения $K_p < 35$, а для стали и оргстекла этот коэффициент практически нулевой. В

экспериментах всегда фиксировали величину проникновения водных растворов солей в ЦПС при их контакте с бездефектными и дефектными образцами. При этом, для каждого уровня проникновения раствора измеряли амплитуду ЭМО при детерминированном импульсном акустическом возбуждении.

Результаты исследования двойного электрического слоя водного раствора $NaCl$ разной концентрации с образцом бездефектного ЦПС приведены на рисунке 4.8.

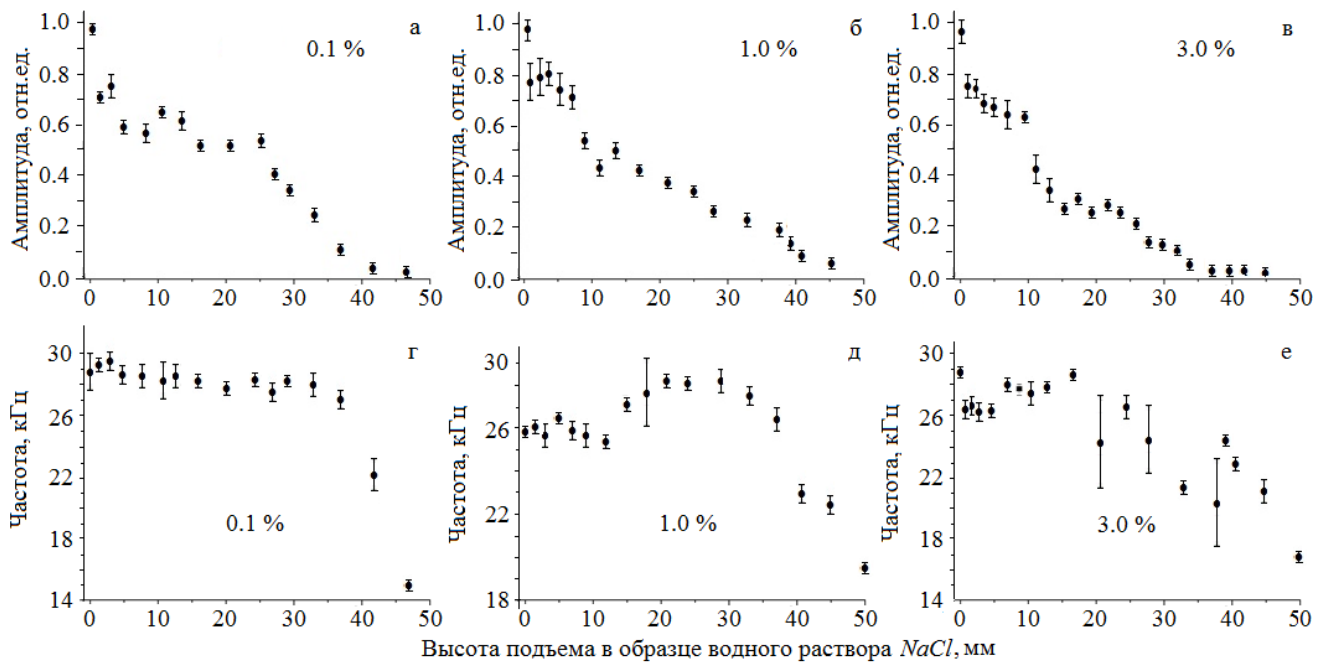


Рисунок 4.8 – Изменения амплитудно-частотных характеристик электромагнитных откликов на внешнее импульсное акустическое воздействие на образцы из цементно-песчаной смеси, находящиеся в контакте с водными растворами $NaCl$ разной концентрации

На рисунке в относительных единицах показаны закономерности изменения амплитуды ЭМО от величины подъема в образце солевых растворов $NaCl$. Концентрация раствора указаны на рисунке 4.8а,б,в. На рисунке 4.8г,д,е приведены весовые распределения спектров этих электромагнитных сигналов из образца ЦПС. На рисунке 4.9 и рисунке 4.10 приведены закономерности в тех же координатах для водных растворов NaI и $CuCl_2$, соответственно.

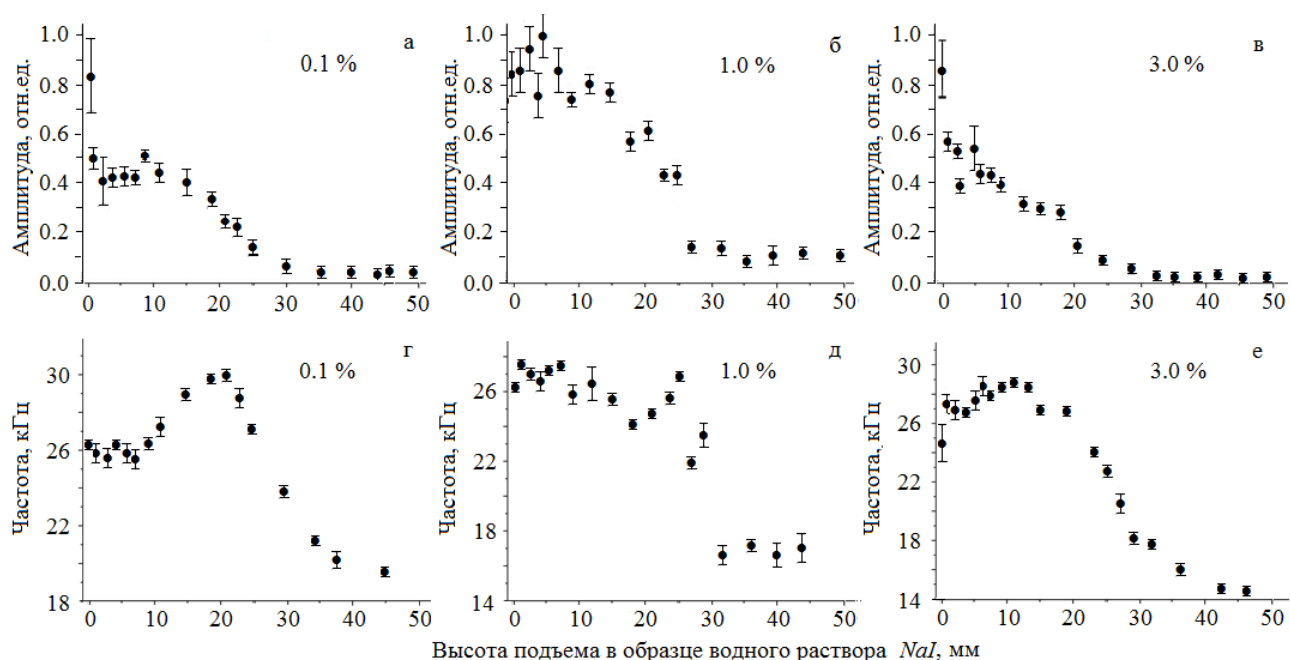


Рисунок 4.9 – Изменения амплитудно-частотных характеристик электромагнитных откликов на внешнее импульсное акустическое воздействие на образцы из цементно-песчаной смеси, находящиеся в контакте с водными растворами NaI разной концентрации

Каждая точка полученных закономерностей на графиках определялась при 4-5 внешних возбуждениях АИ путем усреднения соответствующих амплитуд ЭМО. На рисунках 4.8-4.10 приведение к единице амплитуд ЭМО соответствуют отсутствию проникновения раствора солей в образец. В водных растворах солей происходит диссоциация молекул солей на анионы и катионы. Так как соли имеют ионные химические связи, то их диссоциация происходит по одной ступени [129]. Сравнительный анализ закономерностей изменения амплитуд ЭМО на рисунках 4.8-4.10 показал, что общий их вид от высоты подъема солевых растворов в образцах ЦПС претерпевает спад для всех трех концентраций.

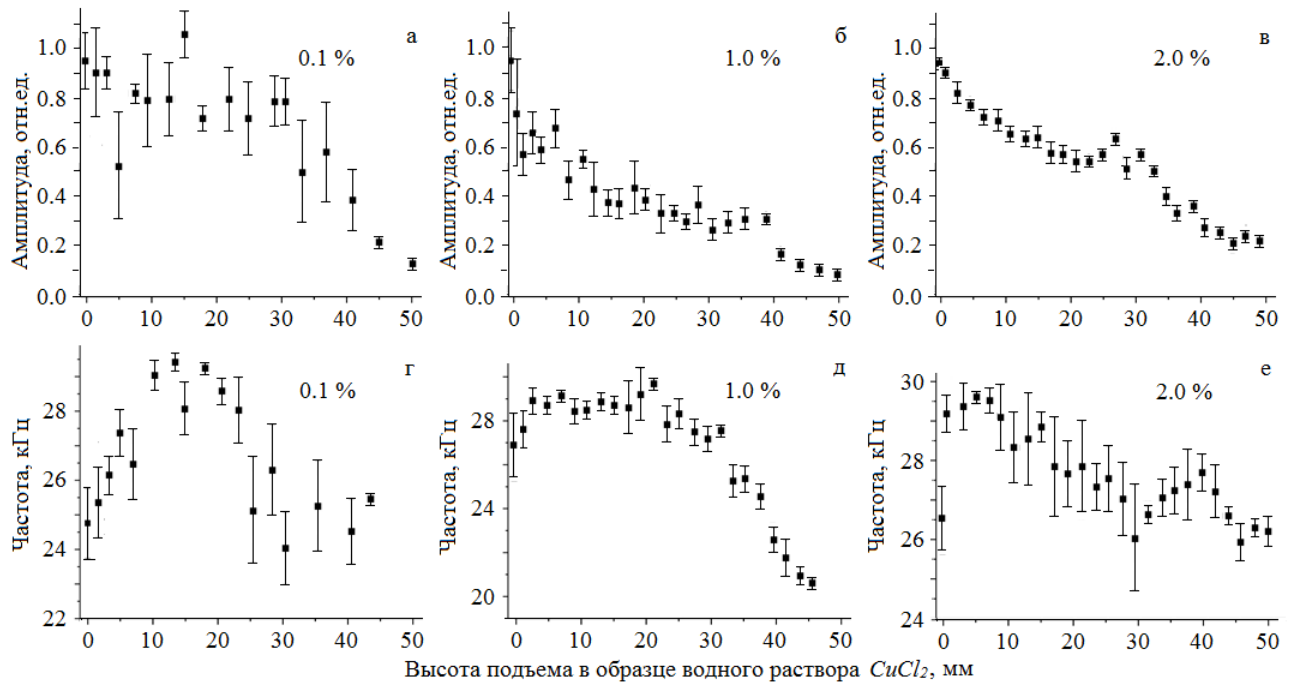


Рисунок 4.10 – Изменения амплитудно-частотных характеристик электромагнитных откликов на внешнее импульсное акустическое воздействие на образцы из цементно-песчаной смеси, находящиеся в контакте с водными растворами CuCl_2 разной концентрации

Отличия наблюдаются в виде вариаций изменения амплитуд ЭМО. При этом надо заметить, что на рисунках 4.8а,б,в и рисунках 4.9а,б,в приведенные зависимости амплитуд ЭМО от глубины проникновения водных растворов солей содержат разные анионы Cl^- и I^- . Молярный массы этих анионов существенно отличается. Так для аниона Cl^- молярная масса составляет 35,45 г/моль, а для аниона I^- – она почти в 3,5 раза больше и равняется 126,9 г/моль. На рисунках 4.10а,б,в показаны изменения амплитуд водных растворов соли CuCl_2 разной концентрации. В этом растворе уже катион Cu^{2+} имеет молярную массу атома 63,55 г/моль, больше чем в 4,5 раза молярной массы катиона Na^+ , которая равна 14 г/моль.

На рисунках 4.8 - 4.10 приведены весовые распределения спектров электромагнитных откликов на внешнее детерминированное акустическое возбуждение тех же образцов ЦПС, используя быстрое преобразование Фурье. Эти распределения отличаются как для растворов с разным процентным содержанием солей, так и для растворов, отличающихся молярной массой катионов и анионов. Приведенные на рисунках различия закономерностей изменения амплитуд

ЭМО обусловлены образованием двойных электрических слоев (ДЭС) на контактах водных солевых растворов и твердотельных диэлектриков [128]. Причем для пористых материалов, каким является ЦПС с коэффициентом пористости $K_p < 35$, такой контакт равномерно распределен по всему объему образца.

На рисунке 4.11 показаны реальные закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов (в вольтах) на внешнее импульсное акустическое воздействие на образцы из цементно-песчаной смеси, находящейся в контакте с водным раствором $NaCl$ разной концентрации, при подъеме раствора по высоте образца h . Используя эти закономерности, можно уверенно определять концентрацию водного раствора до 3% содержания $NaCl$. Для солей NaI и $CaCl_2$ такие закономерности носят более сложный характер, связанный с подвижностью катионов и анионов, и требуют более детального изучения.

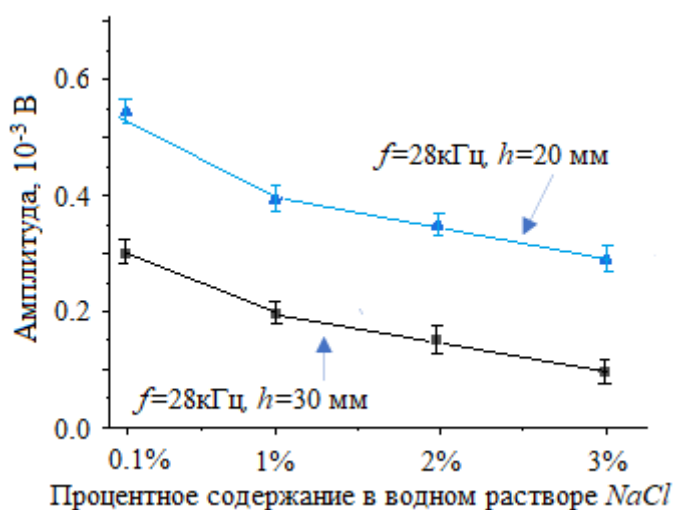


Рисунок 4.11 – Изменения амплитуды электромагнитных откликов на внешнее импульсное акустическое воздействие на образцы из цементно-песчаной смеси, находящиеся в контакте с водным раствором $NaCl$ разной концентрации при подъеме раствора в образца на высоту h

Известно, что натрий является существенно более активным металлом, чем медь. Кроме того, катионы и анионы с меньшей молярной массой обладают большей проникающей способностью и подвижностью, чем находящиеся с ними в молекулярных химических соединениях анионы и катионы, имеющие большие значения молярных масс. В работах [128, 129]

показано, что возрастание размеров анионов при малом радиусе катионов увеличивает пропускание катионов. Таким образом, представленные на рисунке 4.8 и рисунке 4.9 закономерности определяются двойным электрическим слоем, образованным преимущественно катионами Na^+ и неувлажненной частью образца ЦПС. Для водных растворов соли $CuCl_2$ при диссоциации подвижность более высокая у аниона Cl^- по сравнению с катионом Cu^+ . Кроме того, катион Cu^+ менее активен по сравнению с Na^+ . В этом случае ДЭС образуют анионы Cl^- и неувлажненная часть образца ЦПС. В пористых образцах ЦПС вместе с водными растворами солей эти двойные электрические слои перемещаются по глубине образца и изменяется их конфигурация. В соответствии с этим изменяется и электрическая емкость C между ДЭС и неувлажненной частью образца, которая возрастает с подъемом катионов или анионов по глубине образца. Так как заряд q двойного электрического слоя будет постоянным при подъеме раствора соли, то напряженность электрического поля в зазоре ДЭС и поверхностью сухой части образца будет определяться как $U = q/C$. Таким образом, уменьшение амплитуд ЭМО при внешнем импульсном акустическом возбуждении, приведённое на рисунках 4.8, 4.9 и 4.10, обусловлено уменьшением напряженности электрического поля при возрастании емкости.

Изменение весового распределения спектров электромагнитных сигналов также связано с подъемом водных растворов солей. Спектры ЭМО будут видоизменяться из-за разности скоростей акустического импульса в обводненной и сухой части образца. В результате увеличение подъема водных солевых растворов происходит смещение частоты спектрального состава ЭМО в более низкочастотную область в соответствии с соотношением $f = c/L$, где c – скорость звука в обводненной и сухой части образца, L – высота подъема водного раствора солей. В сухой части образца ЦПС продольная скорость звука соответствует 2765 м/с, а в обводненной части образца 1500-1600 м/с. В соответствии с акустико-электрическими преобразованиями в сухой части образца будут возникать более высокочастотные электромагнитные сигналы, но с малой амплитудой.

Неоднозначность изменения весового распределения спектров ЭМО для разных концентраций водных растворов солей вероятно связано с перераспределением концентраций ионов и катионов в двойных электрических слоях и требует дополнительных исследований при наложении внешнего электрического поля.

Для наглядности эффективной работы электромагнитного метода для контроля дефектности пористых материалов в процессе подъема раствора солей было проведено тестирование модельных образцов ЦПС. На рисунке 4.12 отображены закономерности изменения амплитуды ЭМО при внешнем импульсном акустическом воздействии на контакты водного 0.5 % раствора соли $NaCl$ с модельными образцами ЦПС размером $(50 \times 50 \times 100)$ мм³, содержащие дефекты из оргстекла и углеродистой стали.

При изготовлении модельных образцов дефекты размером $(10 \times 10 \times 15)$ мм³ из оргстекла и углеродистой стали располагали соосно вдоль наибольшей грани образца на расстоянии 30 мм со стороны ввода зондирующего акустического импульса возбуждения ЭМО. При этом грань дефектов (10×10) мм² устанавливалась параллельна грани образца (50×50) мм², через которую вводился АИ. Материал дефектов подбирался так, чтобы акустический импеданс ЦПС $5,25 \times 10^6$ кг/с×м² был несколько больше, чем у оргстекла равного $3,24 \times 10^6$ кг/с×м², но значительно меньше, чем у углеродистой стали, который соответствовал величине $45,94 \times 10^6$ кг/с×м². Удельное электрическое сопротивление оргстекла $\rho_{oc} = 10^{13} - 10^{14}$ Ом×м значительно выше, чем у ЦПС, которое имеет значение $\rho_{цпс} = 38,4 \times 10^3$ Ом×м. Углеродистая сталь является проводником и этот параметр имеет очень высокую отрицательную величину $1,3 \cdot 10^{-5}$ Ом×м. На рисунке 4.12 видно, что подъем амплитуды ЭМО соответствует длине дефекта. По результатам этих исследований можно уверенно отметить, что на амплитуду ЭМО оказывает влияние как акустический импеданс пропитанных солевым раствором контактов ЦПС с материалом дефектов, так и их удельное электрическое сопротивление. Акустический импульс из ЦПС с большим акустическим импедансом, чем у оргстекла, почти полностью проходит через дефект. Отражение части

акустической энергии в этом случае минимально. Но большое электрическое сопротивление границы оргстекла с ЦПС создает высокоомный двойной электрический слой, колебание которого внешним АИ обуславливает более интенсивную амплитуду ЭМО.

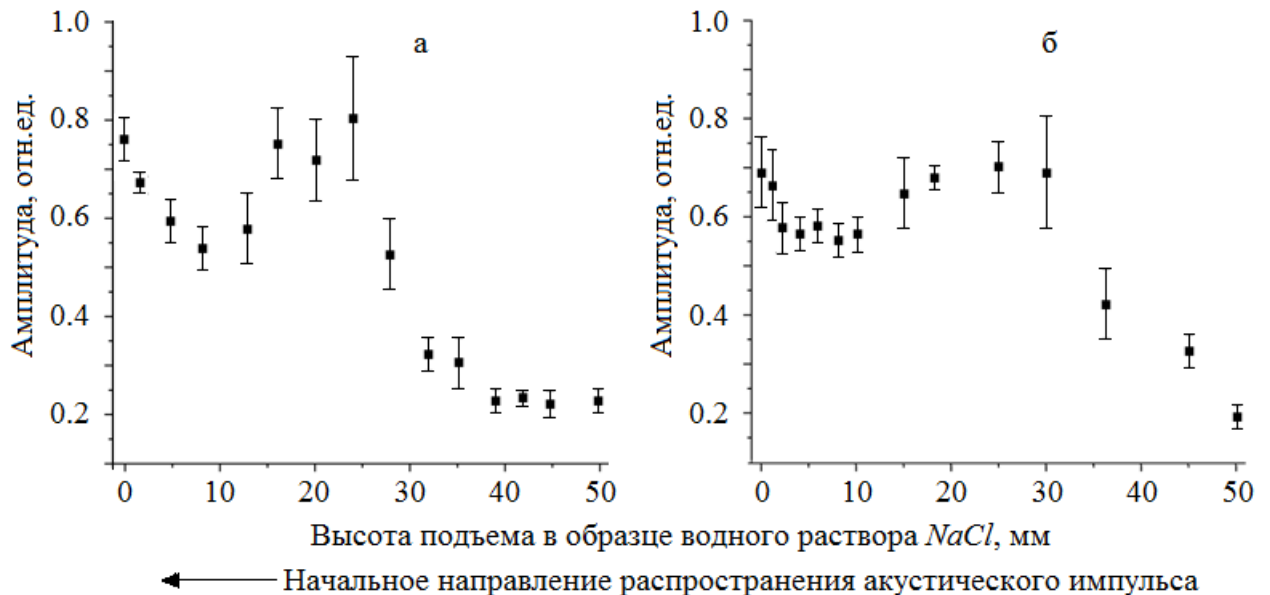


Рисунок 4.12– Закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов при внешнем импульсном акустическом воздействии на контакты водного 0.5 % раствора соли $NaCl$ и образцов из цементно-песчаной смеси с дефектами: а - оргстекло; б – углеродистая сталь

На рисунке 4.12 видно, что подъем амплитуды ЭМО соответствует длине дефекта. По результатам этих исследований можно уверенно отметить, что на амплитуду ЭМО оказывает влияние как акустический импеданс пропитанных солевым раствором контактов ЦПС с материалом дефектов, так и их удельное электрическое сопротивление. Акустический импульс из ЦПС с большим акустическим импедансом, чем у оргстекла, почти полностью проходит через дефект. Отражение части акустической энергии в этом случае минимально. Но большое электрическое сопротивление границы оргстекла с ЦПС создает высокоомный двойной электрический слой, колебание которого внешним АИ обуславливает более интенсивную амплитуду ЭМО. В случае с дефектом из углеродистой стали акустический импульс в большой степени отражается от его поверхности. В дефекте из стали, которая имеет высокую

проводимость, электроны являются обобщенными. В результате границы дефекта более явно выделены, а амплитуда ЭМО немного ниже, чем у образцов ЦПС с дефектом из оргстекла. В общем случае, амплитуда ЭМО будет обусловлена условиями прохождения и отражения акустического импульса от границ контактов ЦПС с материалом дефектов, а также их удельным сопротивлением.

Выводы по разделу 4.2 главы 4

Таким образом, в работе приведены результаты экспериментальных исследований параметров электромагнитных сигналов при акустико-электрических преобразованиях на контактах образцов затвердевшей цементно-песчаной смеси с водными растворами солей.

1. Определены закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов на контактах пористых образцов из цементно-песчаной смеси и водных растворах солей $NaCl$, NaI и $CuCl_2$ разной концентрации. При этом надо отметить, что в растворах $NaCl$ и NaI при диссоциации содержатся анионы Cl^- и I^- с разной молярной массой. Молярная масса аниона I^- в 3,5 раза больше, чем у аниона Cl^- . Каждый из этих анионов, по сравнению с катионом Na^+ , имеет более высокую молярную массу. В результате катионы Na^+ обладают высокой активностью и подвижностью, что и определяет структуру двойного электрического слоя, включающего положительные заряды Na^+ и сухую часть пористого образца ЦПС. В этом случае для $NaCl$ и NaI по всем концентрациям их водных растворов наблюдаются близкие закономерности изменения амплитуд ЭМО от высоты проникновения раствора в образец ЦПС.

2. Показано, что в водных растворах $CuCl_2$ закономерности изменения амплитуды ЭМО от глубины проникновения соли в образец ЦПС при детерминированном внешнем импульсном акустическом возбуждении имеют более видоизмененный характер, чем для растворов $NaCl$ и NaI . Это обусловлено тем, что в силу большой молярной массой и слабой активностью катиона Cu^+ в создании ДЭС участвуют анионы Cl^- .

3. Величина амплитуд ЭМО при внешнем акустическом возбуждении изменяется в соответствии с проникновением водного раствора солей в пористую структуру ЦПС и изменением конфигурации ДЭС. В соответствии с этими изменяется и электрическая емкость C между ДЭС и неувлажненной частью образца, которая возрастает с подъемом катионов или анионов по глубине образца. Так как заряд q двойного электрического слоя постоянный при подъеме раствора соли, то напряженность электрического поля в зазоре ДЭС и поверхностью сухой части образца будет определяться как $U = q/C$. Таким образом, уменьшение амплитуд ЭМО при внешнем импульсном акустическом возбуждении будет обусловлена уменьшением напряженности электрического поля при возрастании емкости.

4. Выявлены закономерности весового распределения спектров ЭМО для водных растворов $NaCl$, NaI и $CuCl_2$. Для всех концентраций солей смещение спектров наблюдается в низкочастотную и высокочастотную области. Это связано с разными скоростями распространения акустических импульсов возбуждения в насыщенной раствором солей и сухой частях пористого образца ЦПС. При этом в сухой части образца будут возникать более высокочастотные электромагнитные сигналы, но с малой амплитудой.

По результатам исследований возможно:

- создание метода для определения уровня проникновения солевых растворов в пористые материалы;
- проводить количественную оценку минерализации природных вод на основании изменения параметров электромагнитных сигналов при контакте солевых растворов с пористыми твердотельными образцами;
- определять размеры дефектов с разным акустическим импедансом и удельным электрическим сопротивлением, в том числе по отношению к материалу твердотельного диэлектрического образца.

Результаты исследований в подразделе 4.2 Главы 4 опубликованы в статье:

Junhua Luo. Acoustic-electric transformations in model solid samples of cement-sand mixture in contact with aqueous salt solutions / Bepalko A.A., Luo J., Dann D.D., Pomishin E.K. // Journal of Applied Geophysics. 2025. Vol. 242. P. 105890. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105890>.

Приведенные результаты являются обоснованием 4 защищаемого положения диссертации.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

I. Основные выводы:

1. Построенная имитационная модель и расчеты, выполненные с ее помощью, демонстрируют эффективность метода трехмерной локации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования. Результаты моделирования показывают, что при математическом определении местоположение дефектов в твердых диэлектрических материалах в расчетные формулы трехмерного алгоритма позиционирования необходимо использование параметров детерминированных акустических импульсов возбуждения в интервальных точках воздействия и подстановки времени прибытия Р-волны полученного электромагнитного отклика.

2. Исследования демонстрируют, что при использовании ручной разметки в качестве эталона, метод CEEDMAN+вейвлет+STA/LTA+AIC с абсолютной амплитудой сигнала на входе обеспечивает погрешность менее 10 мс (86.67% результатов в пределах 5 мс). Данный подход эффективно решает проблему ложных срабатываний традиционных алгоритмов AIC и STA/LTA из-за чувствительности к сильным шумам, демонстрируя высокую точность и стабильность при обработке данных с низким отношением сигнал/шум.

3. Результаты численного моделирования и физических экспериментов подтверждают, что предложенный новый метод трёхмерной локализации дефектов на основе акустико-электрического преобразования позволяет точно определять местоположение дефектов внутри твёрдотельных структур. Данные конечно-элементных экспериментов показывают, что ключевыми факторами, влияющими на спектральное распределение характеристик электромагнитного отклика, являются: расстояние между акустическим источником и дефектом, площадь дефекта, а также угол между направлением распространения акустической волны и плоскостью дефекта в образце.

4. Экспериментально в процессе ступенчатого нагружения сжатием или сдвигом

модельных образцов, в том числе из отвержденной цементно-песчаной смеси, с возбуждением их на каждой ступени нагружения внешними детерминированными акустическими импульсами показано, что изменения параметров электромагнитного отклика позволяет определять стадии развития разрушения образца до появления трещин отрыва.

5. Экспериментально подтверждено, что количественная оценка минерализации природных вод возможна путем идентификации изменений амплитудно-частотных параметров электромагнитных откликов при внешнем воздействии детерминированными акустическими импульсами на двойные электрические слои, образованными на контактах водных солевых растворов с пористыми твердыми образцами.

6. Изменения параметров электромагнитных откликов при внешнем воздействии детерминированными акустическими импульсами на двойные электрические слои показали, что метод акустико-электрических преобразований может успешно использоваться в пористых материалах для определения дефектов в них, отличающихся акустическим импедансом и (или) удельным электрическим сопротивлением.

II. Дополнительные выводы:

Таким образом, по результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Применены методы контроля развития этапов разрушения в диэлектрических образцах в процессе постоянного и ступенчатого сжатия или сдвига при их возбуждения внешними детерминированными акустическими импульсами и измерении параметров электромагнитных откликов на такое возбуждение, а также методы контроля параметров электромагнитных сигналов из пористых материалов, находящихся в контакте с водными растворами солей.

2. Проанализирован метод обработки электромагнитных сигналов с использованием ранговой корреляции Спирмана, а также усовершенствованный метод CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise - комплементарная множественная

декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом) с использованием разложения сигнала на набор собственных мод (EMD): представлен алгоритм расчета EMD; проведен анализ пяти наборов зашумленных данных электромагнитного излучения, который демонстрирует преимущества комбинированного метода CEEMDAN+Wavelet: более эффективное подавление шумовой составляющей; минимизация искажений полезного сигнала; улучшенное сохранение характеристик исходного электромагнитного излучения.

3. Абсолютная амплитуда и скорость изменения энергии сигнала в виде огибающей Гильберта генерируются с самого начала математической обработки модельных или реальных сигналов с целью использования для одновременного вычисления преобразования STA/LTA. Точность срабатывания может быть улучшена путем их перекрестной проверки друг с другом.

4. Построенная имитационная модель и расчеты, выполненные с ее помощью, демонстрируют эффективность метода трехмерной локации дефектов, основанного на технологии акустико-электрического преобразования. Результаты моделирования показывают, что при математическом определении местоположение дефектов в твердых диэлектрических материалах в расчетные формулы трехмерного алгоритма позиционирования необходимо использование параметров детерминированных акустических импульсов возбуждения в интервальных точках воздействия и подстановки времени прибытия Р-волны полученного электромагнитного отклика.

5. Электромагнитный отклик различных дефектных зон и мест их расположения рассчитывается на основе трехмерного моделирования образца при ударном возбуждении. Это облегчает оценку местоположения и размера дефектов на основе спектральных характеристик электромагнитного отклика.

6. Сравнительный анализ трёхмерных расчётов локализации дефектов в виде пор в исследуемых образцах с эталонными значениями координат их центров продемонстрировал удовлетворительную точность. Результаты показывают, что эффект прогнозирования является

идеальным. Это доказывает осуществимость алгоритма в прогнозировании внутреннего положения дефекта тестового образца.

7. На примере отвержденной цементно-песчаной смеси показано, что электромагнитные отклики бездефектных и дефектных образцов при их возбуждении внешним акустическим импульсом в процессе нагружения одноосным сжатием или сдвигом зависят от акустического импеданса дефектов и вмещающего материала. Очевидно, что при возникновении акустических импульсов в процессе образования и развития трещин также надо учитывать влияние акустического импеданса основного материала и дефекта.

8. Анализ амплитудно-частотных параметров ЭМО образцов ЦПС с дефектом из магнетитовой руды показал, что по спектрам электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении можно достоверно осуществлять контроль образования трещин и развития деструкции в процессе нагружения различными видами напряжений. В этом случае на этапе образования и развития зоны деструкции материала спектр регистрируемого ЭМО существенно расширяется как в низкочастотную, так и высокочастотную его область.

9. Экспериментальные исследования ЭМО модельных образцов ЦПС с дефектом показали, что при длительности внешнего акустического возбуждения близкой к продольному размеру дефекта наблюдаются резонансные проявления, которые будут оказывать влияние на изменения закономерностей амплитуд ЭМО.

10. Определены закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов на контактах пористых образцов из ЦПС и водных растворах солей $NaCl$, NaI и $CuCl^2$ разной концентрации. При этом в растворах $NaCl$ и NaI при диссоциации содержатся анионы Cl^- и I^- с разной молярной массой. Молярная масса аниона I^- в 3,5 раза больше, чем у аниона Cl^- . Каждый из этих анионов, по сравнению с катионом Na^+ , имеет более высокую молярную массу. В результате катионы Na^+ обладают высокой активностью и подвижностью, что и определяет

структуру двойного электрического слоя, включающего положительные заряды Na^+ и сухую часть пористого образца ЦПС. В этом случае для $NaCl$ и NaI по всем концентрациям их водных растворов наблюдаются близкие закономерности изменения амплитуд ЭМО от высоты проникновения раствора в образец ЦПС.

11. Показано, что в водных растворах $CuCl_2$ закономерности изменения амплитуды ЭМО от глубины проникновения соли в образец ЦПС при детерминированном внешнем импульсном акустическом возбуждении имеют более видоизмененный характер, чем для растворов $NaCl$ и NaI . Это обусловлено тем, что в силу большой молярной массой и слабой активностью катиона Cu^+ в создании ДЭС участвуют анионы Cl^- .

12. Величина амплитуд ЭМО при внешнем акустическом возбуждении изменяется в соответствии с проникновением водного раствора солей в пористую структуру ЦПС и изменением конфигурации ДЭС. В соответствии с этими изменяется и электрическая емкость C между ДЭС и неувлажненной частью образца, которая возрастает с подъемом катионов или анионов по глубине образца. Так как заряд q двойного электрического слоя постоянный при подъеме раствора соли, то напряженность электрического поля в зазоре ДЭС и поверхностью сухой части образца будет определяться как $U = q/C$. Таким образом, уменьшение амплитуд ЭМО при внешнем импульсном акустическом возбуждении будет обусловлена уменьшением напряженности электрического поля при возрастании емкости.

13. Выявлены закономерности весового распределения спектров ЭМО для водных растворов $NaCl$, NaI и $CuCl_2$. Для всех концентраций солей смещение спектров наблюдается в низкочастотную и высокочастотную области. Это связано с разными скоростями распространения акустических импульсов возбуждения в насыщенной раствором солей и сухой частях пористого образца ЦПС. При этом в сухой части образца будут возникать более высокочастотные электромагнитные сигналы, но с малой амплитудой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 тт. М.: Машиностроение, 2008.
2. Physical Acoustics (edited by W.P. Mason), New York: Academic Press, 1964. V.1, 532 p.
3. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
4. Fu L.Y., Fu B.Y., Sun W., Han T., Liu J. Elastic wave propagation and scattering in prestressed porous rocks. // Science China Earth Sciences. 2020. Vol. 63. P. 1309–1329. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9615-3>.
5. Неразрушающий контроль (ред. В.В. Сухоруков). М.: Высшая школа, 1992. 321 с.
6. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer, 1997. 261 p.
7. Lu J., Han X., Newaz G., Favro L.D., Thomas R.L. Study of the effect of crack closure in sonic infrared imaging // Nondestructive Testing and Evaluation. 2000. Vol.22, No.2. P. 127 – 135.
8. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. 1981. Т.256, №4. С. 824-826.
9. Bepalko A.A., Dunn D.D., Petrov M.V., Pomishin E.K., Utsin G.E., Fedotov P.I. Electromagnetic Methods for Testing Changes in Stress-Strain State of Dielectric Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021, Vol. 57, No. 10, P. 865–876. <https://Doi.org/10.1134/S1061830921100028>.
10. Беспалько А.А., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц. Численное и экспериментальное моделирование акустоэлектрического метода неразрушающего контроля твердотельных диэлектриков // Приборостроение. 2023. №4. С. 320-334. <https://doi:10.17586/0021-3454-2023-665-4-320-334>.
11. Ida N. Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation, London: Chapman & Hall edition, 1995. 511 p.
12. Михеев М.Н., Горкунов Е.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля, 1993. 266 с.
13. Francesco Ficilli. Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 140 p.
14. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия, М.: Атомиздат, 1974. 510 с.
15. ГОСТ Р 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М: Стандартинформ, 2019.
16. Yan B., Chen L., Wu C., Ma H. 3D ultrasonic reconstruction of contour node represented voids and cracks. // NDT & E International. 2021. Vol. 117. Art:102382.

<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102382>.

17. Chang J., Chu Z., Gao X., Soldatov A.I., Dong S. A magnetoelectric-ultrasonic multimodal system for synchronous NDE of surface and internal defects in metal // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol.183. Art. 109667, 13 p.

<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109667>.

18. Wang Z, Peng Z, Yan Y, et al. Computed tomography of layered defects in large-diameter pile foundation using transmission of hybrid ultrasonic modes // *Structures*. 2025. Vol. 74, No. 2. Art. 108545. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108545>.

19. Li Z., Li K., Wang J., & Li L. Application of Ultrasonic Computerized Tomography Technique to Detect the Internal Defects in Cement-based Mortar. // In XVI International Conference on Durability of Building Materials and Components, Beijing. 2023. P. 1-10.

20. Wear K. A. (2019). Considerations for Choosing Sensitive Element Size for Needle and Fiber-Optic Hydrophones-Part I: Spatiotemporal Transfer Function and Graphical Guide. // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2019. Vol. 66, No. 2. P. 318–339. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(96\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(96)00051-5).

21. Ультразвук. Маленькая энциклопедия (под ред. И.П. Галямина). М: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

22. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. - М.: Металлургия, 1991. 752 с.

23. Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Том 7. Книга 1. Метод акустической эмиссии. Книга 2. Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.

24. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении (Издание: 4-е). С-Петербург: Изд-во СВЕН, 2014. 312 с.

25. Капранов Б.И., Коротков М.М. Акустические методы контроля и диагностики (Учебное пособие, ч.1.). Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 185 с.

26. Fan L., Wang C., Hu D. Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics of Uniaxial Compression of MICP-Filled Sandstone // *Materials*. 2023, Vol. 16. P. 3428. [Doi.org/10.3390/ma16093428](https://doi.org/10.3390/ma16093428).

27. Еременко В.П. Сравнение ультразвукового и акустико-эмиссионного методов контроля напряженно-деформированного состояния строительных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2008. № 7. С. 25-29.

28. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кареев А.Е. и др. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 2004. №7. С.

34-41.

29. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33, № 2. С. 31-35.

30. Liu K.-D., Zhou Y., Zhang X.-P., Fu S.-J., Liu Q.-S., Dong P., Yao K.-W., & Wang D.-B. Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of deep diorite under uniaxial compression. // Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 2. P. e24482.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24482>.

31. Zhao Y., Li X., Huang L., Zhang Z., & Xu Z. Characteristic stress variation and microcrack evolution of granite subjected to uniaxial compression using acoustic emission methods. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024. Vol.16, No.9. P. 3511-3523. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.023>.

32. Liu X., Zhang H., Wang X., Zhang C., Xie H., Yang S., Lu W. Acoustic Emission Characteristics of Graded Loading Intact and Holey Rock Samples during the Damage and Failure Process // Applied sciences. 2019. Vol. 9. P. 1595. <https://doi.org/10.3390/app9081595>.

33. Xu C., Xue L., Cui Y., Zhai M., & Bu F. Critical slowing down phenomenon for predicting the failure of solid rocks and cement mortar materials: Insight from acoustic emission multiparameters // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 399, No.6. Art. 132523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132523>.

34. Rucka M., Knak M., & Nitka M. A study on microcrack monitoring in concrete: discrete element method simulations of acoustic emission for non-destructive diagnostics // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 293. Art. 109718.

<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109718>

35. Zhou J., Liu L., Zhao Y., Zhu M., Wang R., Zhuang D. An Improved Rock Damage Characterization Method Based on the Shortest Travel Time Optimization with Active Acoustic Testing // Mathematics 2024, Vol. 12, No. 1. P. 161. <https://doi.org/10.3390/math12010161>

36. Zhang W., Yu J., Xu X., Ren J., Liu K., & Shi H. Waveform Complexity and Positioning Analysis of Acoustic Emission Events during the Compression Failure Process of a Rock Burst Prone Sample // Buildings. 2024. Vol. 14, No. 5. P. 1331.

<https://doi.org/10.3390/buildings14051331>.

37. Li Y., & Zuo J. (2025). Measuring crack evolution in artificial rocks under different quasi-static loading rates: insights from mechanical-optical-acoustic monitoring // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025. Vol. 58, No.12. P. 13005-13026. Doi:10.1007/s00603-025-04770-8.

38. Zhang, J., Peng, L., Wen, S., & Huang, S. A review on concrete structural properties and damage evolution monitoring techniques // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No.2. P. 620. <https://doi.org/10.3390/s24020620>.
39. Ciaburro G., & Iannace G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences* // 2022. Vol. 12, No. 20. P. 10476. [Doi.org/10.3390/app122010476](https://doi.org/10.3390/app122010476).
40. Verstryngne E., Lacidogna G., Accornero F., & Tomor A. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures. *Construction and Building Materials* // 2021. Vol. 268. P.121089. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121089.
41. Jiang R., Dai F., Liu Y., Li A., & Feng P. Frequency characteristics of acoustic emissions induced by crack propagation in rock tensile fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering* // 2021. Vol. 54, No.4. P. 2053-2065. Doi:10.1007/s00603-020-02351-5.
42. Неразрушающий контроль: в 5 кн.: кн. 3: Электромагнитный контроль / под ред. В.В. Сухорукова. М.: Изд. Высшая школа, 1991. 312 с.
43. Ida N. Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation. Publisher: Springer. 2013, 527 p. ISBN-13: 978-1475705621.
44. McCann D.M. and Forde M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry Structures // *NDT & International*. 2001. Vol. 34, No. 2. P. 71–84. Doi:10.1016/S0963-8695(00)00032-3.
45. Hu X., Xie R., Wang R., Wang J., Cai H., Wang X., Li X., Guan Q. and Zhang J. Research on Quantitative Evaluation of Defects in Ferromagnetic Materials Based on Electromagnetic Non-Destructive Testing. *Sensors* // 2025, Vol. 25, No. 11. P. 3508. <https://doi.org/10.3390/s25113508>.
46. Machado M. A. Eddy currents probe design for NDT applications: A review. *Sensors (Basel, Switzerland)* // 2024. Vol.24, No. 17. P. 5819. Doi: 10.3390/s24175819.
47. Zhang Q., Mo H., Li R., Liang C., & Luo J. Nondestructive Testing Method for Electrical Capacitance Tomography Based on Image Reconstruction of Rotating Electrodes // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2024. Vol. 60, No. 6. P. 636-647.
48. Zhang Q, Mo H, Li R, Liang Ch., Luo J., Bepal'ko A.A. Image reconstruction method based on wavelet fusion in electrical capacitance tomography with rotatable electrode sensor // *Measurement*. 2024. Vol. 238, id.115354.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115354>.
49. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. М.: Атомиздат, 1974. 510 с.
50. Osipov S.P., Usachev E.Y., Chakhlov S.V., Shchetinkin S.A., Kamysheva E.N. Selecting parameters

of detectors when recognizing materials based on the separation of soft and hard X-ray components // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 797-810. <https://doi.org/10.1134/S1061830918110074>.

51. Kumar, A., & Arnold, W. (2022). High resolution in non-destructive testing: A review // Journal of Applied Physics. 2022. Vol. 132, No. 10. P. 100901. Doi:10.1063/5.0095328.

52. Sharma S.R., Chauhan V.S. and Sinapius M.A. review on deformation-induced electromagnetic radiation detection: history and current status of the technique // Journal of Materials Science. 2021. Vol. 56. P. 4500–4551. Doi.org/10.1007/s10853-020-05538-x.

53. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // УФН. 1968. Т.96, в.1. С. 39-60. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0096.196809c.0039>; Urusovskaya A.A. Electrical effects associated with plastic deformation of ionic crystals // Physics–Uspekhi, 1969, Vol. 11, No. 5. P. 631–643.

Doi: <https://doi.org/10.1070/PU1969v011n05ABEH003738>.

54. Hadjicontis V. & Mavromatou C. & Ninos D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation // Natural Hazards and Earth System Science. 2004. Vol.4. P. 633-639. Doi:/10.5194/nhess-4-633-2004.

55. Kothari A., Chauhan V. S., Kumar A., Kumar R., Vaish R. and Abbas S. Effect of Peierls stress and strain-hardening parameters on EMR emission in metals and alloys during progressive plastic deformation // International Journal of Materials Research. 2016. Vol. 107, No. 6. P. 503-517. <https://doi.org/10.3139/146.111376>.

56. Misra A., Prasad R.C., Chauhan V.S., Srilakshmi B. A theoretical model for the electromagnetic radiation emission during plastic deformation and crack propagation in metallic materials. International Journal of Fracture. 2007. Vol.145, No. 2. P. 99-121.

Doi:10.1007/s10704-007-9107-0.

57. Gade S.O., Alaca B.B. and Sause M.G.R. Determination of Crack Surface Orientation in Carbon Fibre Reinforced Polymers by Measuring Electromagnetic Emission // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. Vol.36. Art.21. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0403-y>.

58. Koktavy P. Experimental study of electromagnetic emission signals generated by crack generation in composite materials // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20, No.1. Art. 015704. Doi: 10.1088/0957-0233/20/1/015704.

59. Fursa T.V., Surzhikov A.P. & Gol'd R.M. Electromagnetic Method for Estimating Hardness of Dielectric Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2001. Vol. 37. P. 615–617. <https://doi.org/10.1023/A:1014931205112>.

60. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и Геофизика. 1970. № 12. С. 3-13.
61. Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н. Изменения электропроводности и радиоизлучения горных пород и минералов в ходе физико-химических процессов в них. ДАН СССР. – 1975. Т. 220, № 1. С. 82-85.
62. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. 1981. Т. 256, №4. С. 824-826.
63. Ogawa T., Oike K., & Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1985. Vol. 90, D4. P.6245 - 6249.
64. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. Влияние слоистости алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2002. № 2. С. 27 – 32.
65. Wang En-Yuan, HE Xue-Qiu, DOU Ling-Ming, ZHOU Shi-Ning, NIE Bai-Sheng, LIU Zhen-Tang. Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application // Chinese Journal of Geophysics (in Chinese). 2005. Vol. 48, No. 1. P. 237-242. Doi: 10.1002/cjg2.645
66. Bepal'ko, A.A., Yavorovich, L.V., Viitman, E.E., Shtirts V.A. Dynamoelectric energy transfers in a rock mass under explosion load in terms of the Tashtagol mine // Journal of Mining Science. 2010. Vol.46, No. 2. P. 136–142. Doi.org/10.1007/s10913-010-0018-5.
67. Yin S., Song D., He X., Qiu L., Wei W., Wang C., Chen Y., Li P. Time-frequency evolution law and generation mechanism of electromagnetic radiation in coal friction process // Engineering Geology. 2021. Vol. 294, No. 7. Art.106377.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106377>.
68. Bepal'ko, A.A., Yavorovich, L.V., Fedotov P.I. Diagnostics of destruction zone development in rock specimens during uniaxial compression based on the spectral characteristics of electromagnetic signals // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47, No. 10. P. 680-686. Doi: 10.1134/s1061830911100068.
69. Волярович М.П., Пархоменко Э.И. Пьезоэлектрический эффект горных пород // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1955. N 3. С. 215-222.
70. Гольд Р.М., Марков Г.П., Могила П.Г., Самохвалов М.А. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подверженных механическому нагружению // Известия Академии Наук СССР. Серия Физика Земли. 1975. № 7. С.109-111.
71. Frid V., Rabinovitch A. and Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation // Journal of

- Physics D: Applied Physics. 2003. Vol. 36, No. 13. P. 1620-1628. Doi: 10.1088/0022-3727/36/13/330.
72. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G. and Agosto A. Acoustic and Electromagnetic Emissions as Precursor Phenomena in Failure Processes // *Strain*. 2011. Vol.47, No.2. P. 144-152. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2010.00750.x>
73. Yoshida S., & Ogawa T. Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2004. Vol. 109, Issue B9. Doi:10.1029/2004JB003092.
74. Freund F. Charge generation and propagation in igneous rocks. *Journal of Geodynamics*. 2002 2002/05/01;33(4):543-570. doi: [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00015-7).
75. Yavorovich L.V., Bepalko A.A., Fedotov P.I., Baksht R.B. Electromagnetic Radiation Generated by Acoustic Excitation of Rock Samples // *Acta Geophysica*. 2016. Vol. 64, No. 5. P. 1446-1461. Doi: 10.1515/acgeo-2016-0081.
76. Беспалько А.А., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Яворович Л.В., Клишко В.К., Штирц В.А., Шипеев О.В. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т.7. Спец. вып. (Ч. 2). С. 343–346.
77. Sobarso J.C., Pertl F., Balazs D.M., Costanzo T., Sauer M., Foelske A., Ostermann M., Pichler Ch.M., Wang Y., Nagata Yu., Bonn M., Vaitukaitis S.. Spontaneous ordering of identical materials into a triboelectric series // *Nature*. 2025. Vol. 638 (8051). P. 664—669. Doi: 10.1038/s41586-024-08530-6.
78. Bepalko 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. Vol. 52, No 2. P. 279-285. Doi:10.1134/S1062739116020418.
79. 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.
80. Bepalko A.A., Surzhikov A.P., Dann D.D. Comparison of Acoustic-Electrical Non-Destructive Testing of Solid-State Dielectrics in Electrical and Magnetic Fields // *Journal «Testing. Diagnostics»*. 2023. Vol. 26, No. 8. P. 18-25. Doi: 10.14489/td.2023.08.pp. 018-025.
81. Han M., Chen X., Yu B. & Zhang H. Coupling of piezoelectric and triboelectric effects: from theoretical analysis to experimental verification // *Advanced Electronic Materials*. 2015. Vol. 1. 1500187 (12 pp). <https://doi.org/10.1002/aelm.201500187>.
82. Takeuchi A, Nagahama H. Interpretation of charging on fracture or frictional slip surface of rocks // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2002. Vol.130, No. 3. P. 285-291.

[https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00013-4).

83. 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.
84. 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.
85. 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. 53(2), с. 104-110.
86. Bepal'ko A.A., Gold R.M., Yavorovich L.V. The effect of calcite electrification on the parameters of electromagnetic signals under pulsed acoustic action // Physical Mesomechanics. 2004. vol.7, No. 5. pp. 95-99.
87. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. Генерация электромагнитного излучения двойными электрическими слоями и ее проявление при землетрясениях // ДАН СССР. 1983. Т. 271, № 1. С. 80—83.
88. Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks // Geophysical Research letters. 1977. V. 4, No. 8. P. 333—336. Doi: 10.1029/GL004I008P00333.
89. Беспалько А.А., Люкшин Б.А., Уцын Г.Е., Яворович Л.В. Электромагнитный отклик слоистых диэлектрических структур на импульсное акустическое воздействие // Известия ВУЗов. Физика. 2015. Т. 58. № 4. С. 120—126. Doi: 10.1007/s11182-015-0535-4.
90. Fursa T.V., Dunn D.D. Development of a method for flaw detection of heterogeneous dielectric materials based on the use of the phenomenon of mechanoelectrical transformations // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. No. 1. P. 8—13. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15017377>.
91. Fursa T.V., Utsyn G.E., Petrov M., Dann D.D., Sokolovskiy A.N. Detecting degradation in reinforced concrete subjected to uniaxial compression, using the parameters of electric response to mechanical impact // Research in Nondestructive Evaluation. 2019. V. 30. Is. 6. No. 2. P. 317—333. Doi: 10.1080/09349847.2018.1522404.
92. Khorsov P.N., Surzhikov V.P., Demikhova A.A. Development the Adjusted Mathematical Model of Responses in the Nondestructive Testing Defectiveness Method Based on the Mechanoelectrical Transformations // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 168. P. 012106. Doi:10.1088/1757-899X/168/1/012106.
93. Bepal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Slepchenko G., Pomishin E., Dmitrieva S. Application of the acoustic-electric method to estimate the mineralisation of natural water in contact with rocks //

- Journal of Applied Geophysics. 2020. V. 181. P. 104140. [Doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104140](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104140).
94. Беспалько А. В., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц. Численное и экспериментальное моделирование акустико-электрического метода неразрушающего контроля твердотельных диэлектриков // Journal of Instrument Engineering. 2023. Vol. 66, N 4. P. 320—334 (in Russian). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334.
95. Markov, M., Markov, A., Levin, V., & Sabina, F. J. (2022). Electromagnetic field generated by acoustic wave scattering at a poroelastic inclusion located in a fluid // International Journal of Engineering Science. 2022. Vol. 181, No. 4. P. 103766.
Doi: 10.1016/j.ijengsci.2022.103766
96. Zhang Y.Z., Xiao L.Z., Chu Z.H. Li Z.X. The converted electromagnetic wave characteristics of seismoelectric conversion effect in borehole // Chinese Journal of Geophysics. 2005. Vol. 48, No.2. P. 452-458. Doi: 10.1002/cjg2.680.
97. Zhang G., Che X., Qiao W., Ju X., Lu J., Men B. Characteristics of the interface acoustoelectric conversion waveform in fluid-filled boreholes. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. V.207, No.12. 109174.(13 p.). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109174>.
98. Kaatz U., Hubner Ch. Electromagnetic techniques for moisture content determination of materials Measurement Science and Technology 2010. Vol.21, No 8. 082001 (26 p.). Doi:10.1088/0957-0233/21/8/082001.
99. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.P., Slepchenko G.B., Fedotov P. Application of acoustic-electric method for estimation of mineralization of natural waters at their contact with rocks. // Journal of Applied Geography. 2020. Vol. 181, No.4. 104140. Doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104140
100. Бадьин Г.М. Справочник технолога-строителя // СПб.: БХВ-Петербург. 2010. 528 с.
101. Dodge Y. The Concise Encyclopedia of Statistics. New York: Springer-Verlag. 2010. 502 p. ISBN 978-0-387-31742-7.
102. Омпоков В.Д., Бороноев В.В. Комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом CEEMDAN как метод решения основных проблем применения преобразования Гильберта-Хуанга // Журнал Радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 1-7. Электронный журнал ISSN 1684-1719.
103. Mousavi A.A., Chunwei Zhang Ch., Masri S.F. and Gholipour G. Structural Damage Localization and Quantification Based on a CEEMDAN Hilbert Transform Neural Network Approach: A Model Steel Truss Bridge Case Study // Sensors. 2020. Vol. 20(5). P. 1271. <https://doi.org/10.3390/s20051271>.
104. Huang N., Shen Z., Long S.R., Wu M.L.C., Shih H., et al. The empirical mode decomposition

- and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998. 454 (1971), P.903-995. [ff10.1098/rspa.1998.0193ff](https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193). [ffhal-04014501f](https://hal.science/hal-04014501f) (This version HAL Id: [hal-04014501](https://hal.science/hal-04014501)<https://hal.science/hal-04014501v1>. Submitted on 6 Mar 2023).
105. Quinn A.J., Lopes-Dos-Santos V., David Dupret D., Nobre A.C., Mark W Woolrich M. W. EMD: Empirical Mode Decomposition and Hilbert-Huang Spectral Analyses in Python // *Journal of Open Source Software*. 2021. Vol.6(59). P.2977. Doi: 10.21105/joss.02977.
 106. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М: Наука. 1990. 688 с. ISBN: 5-02-014032-5.
 107. Kitte Ch. Kittel's Introduction to Solid State Physics, (Global Edition, 8th Edition). 2018. 720 p. ISBN: 978-1-119-45620-9.
 108. Орешкин П. Физика полупроводников и диэлектриков. М: Высшая школ. 1977. 448 с.
 109. Shinbrot T., Komatsu T., & Zhao Q. Spontaneous tribocharging of similar materials. // *EPL (Europhysics Letters)*. 2008 Vol. 83, No. 2. P. 24004 (6 p.). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/83/24004>.
 110. Liu X., Zhao J., Wang Y., Peng P. Automatic Picking of Microseismic Events P-wave Arrivals Based on Improved Method of STA/LTA[J] // *Journal of Northeastern University: Natural Science*. 2017. Vol.38? No. 5. P. 740-745. <https://xuebao.neu.edu.cn/natural/EN/Y2017/V38/I5/740>.
 111. Trnkoczy, A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. (Bormann P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. 2012. P. 1-20. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1.
 112. Liu Y., Wang W. Advances in Geometric Modeling and Processing (F. Chen, B. Juttler). *Lecture Notes in Computer Science*. 2008. Vol. 4975. P.384–397. Doi:10.1007/978-3-540-79246-8.
 113. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Е.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. – 560 с.
 114. Королев М.В. Аперриодический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов // *Дефектоскопия*. 1973. №4. С.12–18.
 115. Казанцев В. Ю., Мищенко И. Т. Солеобразование при добыче нефти // М: Орбита-М, 2004. 432 с.
 116. Kilchmann S. Typology of recent groundwaters from different aquifer environments based on geogenic tracer elements. Lausanne EPFL; 2001. Doi:10.5075/epfl-thesis-2411.
 117. Еременко А.А., Филиппов В.Н., Никитенко С.М., Христюков Е.А. Особенности

- освоения железорудных месторождений Горной Шории //ФТПРПИ. 2017. №5. С. 79-95. Doi: 10.15372/FTPRPI20170510.
118. Кащавцев В.Е. Роль пластовых вод в процессе осадкообразования солей при добыче нефти // Нефть, газ и бизнес. 2004. No 1. С. 42-45.
119. Nebel B., Wright R. Environmental Science. The Way the World Works. // New Jersey: Prentice Hall; 1993. 630 p.
120. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод // Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1970. 488 с.
121. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Калошин В.А., Мошков А.В. Использование радиометрии СВЧ-диапазона для измерения солености поверхностных вод Мирового океана // Журнал Радиоэлектроники, 2015. № 1. С. 1-13.
122. Kaatze U., Hubner Ch. Electromagnetic techniques for moisture content determination of materials // Measurement Science and Technology. 2010. Vol.21, No 8. 082001 (26 p.). Doi:10.1088/0957-0233/21/8/082001
123. Yavorovich L.V., Gold R.M., Lasukov V.V. Investigation of electromagnetic-signal amplitude during impact action on rock specimens with different porosity // Journal of Mining Science. 1999. Vol. 35, No 6. P.587-593. Doi:10.1007/BF02550290.
124. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.P., Slepchenko G.B., Fedotov P. Application of acoustic-electric method for estimation of mineralization of natural waters at their contact with rocks. // Journal of Applied Geography. 2020. Vol. 181, No.4. 104140. Doi:10.1016/j.jappgeo.2020.104140.
125. Zhang G., Che X., Qiao W., Ju X., Lu J., Men B. Characteristics of the interface acoustoelectric conversion waveform in fluid-filled boreholes. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. V. 207, No 12. 109174.(13 p.). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109174>.
126. Frid V. Electromagnetic radiation method water-infusion control in rockburst-prone strata. Journal of Applied Geography. 2000. V. 43. P. 5-13. Doi:10.1016/S0926-9851(99)00029-4
127. Bepalko A.A., Luo J., Dann D.D., Pomishin E.K. Acoustic-electric transformations in model solid samples of cement-sand mixture in contact with aqueous salt solutions // Journal of Applied Geophysics. 2025. Vol. 242. P. 105890. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105890>.
128. Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц // М.: Большая российская энциклопедия, 1992. 639 с. ISBN 5-82270-039-8.
129. Воронов В. Н., Александров К.С. Роль стерических факторов в процессах ионной подвижности в соединениях с перовскито-подобной структурой // ФТТ. 1985 Т. 27, N. 7. С. 1968-1976.