

*На правах рукописи*



ЛААС РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ  
ЗАЛЕГАНИЯ МАКРОДЕФЕКТОВ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ НА  
ОСНОВЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

**Научный руководитель :**

**Суржиков Анатолий Петрович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки Российской Федерации

**Официальные оппоненты:**

**Смирнов Геннадий Васильевич**

доктор технических наук, профессор , ФГБОУ ВО  
«Томский государственный университет систем  
управления и радиозлектроники», профессор кафедры  
радиоэлектронных технологий и экологического  
мониторинга

**Клопотов Анатолий Анатольевич**

доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ  
ВО «Томский государственный архитектурно-  
строительный университет», профессор кафедры  
прикладной механики и материаловедения

Защита диссертации состоится « 18 » июня 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

К.Т.Н., доцент



Шевелева Е.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

Композиционные конструкционные материалы уже по своей сути предназначены для использования в условиях статических и (или) динамических нагрузок. Понятно, что контроль за прочностью и степенью дефектности конструкционных материалов важен как на стадии их производства, так и при эксплуатации. Поэтому разработка и совершенствование методов и аппаратуры неразрушающего контроля конструкционных материалов является актуальной задачей.

Значимое место среди материалов конструкционного назначения занимают неметаллические материалы, к которым можно отнести бетоны, асфальт, цементно-песчаные смеси, керамику и т.п.

Существующие отработанные и стандартизованные методы и аппаратура неразрушающего контроля возникновения и накопления упругих напряжений, оценки напряжённо-деформированного состояния и степени дефектности таких материалов обладают рядом недостатков и имеют невысокую точность.

Перспективным методом неразрушающего контроля подобного рода несовершенств структуры таких материалов является метод основанный на установленном в Томском политехническом университете явлении генерирования переменных электромагнитных полей при импульсном механическом возбуждении гетерогенных неметаллических материалов с дефектной структурой – метод механоэлектрических преобразований (МЭП). Роль источников механоэлектрических преобразований как раз и выполняют несовершенства структуры объекта контроля.

Данный метод до настоящего времени использован для оценки напряжённо-деформированного состояния и контроля интегральной дефектности материала, а также для определения областей с их максимальным проявлением.

Однако, по нашему мнению, данный метод имеет потенциальные возможности и для определения местоположения (локации) по поверхности и глубине залегания (в объеме) материала отдельных макродефектов структуры, а также оценки их формы и размеров.

### **Степень разработанности темы.**

Вопросами изучения методов контроля неметаллических материалов на основе метода механоэлектрических преобразований подробно занимается коллектив проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета ПНИЛ ЭДИП НИ ТПУ. Само явление механоэлектрических преобразований и процесс генерации электромагнитного излучения при деформации неметаллических сред активно изучался отечественными и зарубежными научными группами.

Вопросы генерации электромагнитного излучения при деформации неэлектрических сред рассматриваются в работах Воробьева А.А., Молоцкого М.И., Перельмана М.Е., Хатиашвили Н.Г., Панасюка В.В и др.

Методы и технические средства диагностики напряжённо-деформированных состояний неметаллических сред, таких как горные породы, рассматривались в

работах Яковицкой Г.Е., Колмакова В.В., Воробьева А.А., Беспалько А.А., Гохберга М.Б., Гора А.Ю., Корнейчикова В.П. и других.

Более подробное изучение неметаллических материалов при различных деформациях, в том числе сжатиях, прохождении волн упругой деформации, циклическом замораживании – оттаивании, изучались в работах Суржикова А.П., Хорсова Н.Н., Фурсы Т.В., Осипова К.Ю., Дана Д.Д. и других.

Более подробное рассмотрение возможности использования метода механоэлектрических преобразований для оценки дефектности и поиска отдельных дефектов рассмотрены в работах Малышкова Ю.П., Гордеева В.Ф., Суржикова А.П., Хорсова Н.Н., Хорсова П.Н.

Таким образом анализ литературы позволил выявить противоречие между описанными возможностями использования метода механоэлектрических преобразований для поиска и определения положения отдельных дефектов и полным отсутствием описанных в литературе методик и алгоритмов применения метода с этой целью, а также подходов к обработке получаемых сигналов.

**Объект исследования:** метод механоэлектрических преобразований.

**Предмет исследования:** локация макродефектов в объеме неметаллических конструкционных материалов.

**Цель работы:** обоснование и разработка метода и математической модели сканирующей системы оценки местоположения макродефектов с использованием МЭП.

**Основные задачи исследования:**

– Провести предварительные исследования местоположения дефектов в виде отверстий в исследуемом образце из бетона с использованием сканирующей системы контроля на основе МЭП.

– Разработать математическую модель для исследования искажения формы откликов от геометрических характеристик системы «излучатель-объект контроля-приемник сигнала».

– Промоделировать импульсные характеристики откликов в зависимости от параметров системы контроля.

– Разработать алгоритм расчета частотно-зависимого затухания.

– Разработать методы оценки глубины залегания макродефекта с использованием фазовых характеристик и корреляционного анализа откликов при импульсном возбуждении образца.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:**

На основе явления механоэлектрических преобразований реализован новый подход к созданию высокочувствительной аппаратуры и алгоритмов оценки местоположения и глубины залегания макродефектов в исследуемом объекте контроля.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы в разработке системы промышленной локации макродефектов в объеме неметаллических материалов. Научные результаты работы и разработанный экспериментальный стенд использованы в отделении «Контроль и диагностика» Томского политехнического университета при обеспечении учебного процесса по дисциплинам дефектоскопического

профиля, а также в ООО «Системы. Технологии. Коммуникации» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

**Методология и методы исследования:** При проведении исследований были использованы теоретические методы исследования, такие как изучение, анализ нормативной, справочной и научной литературы; эмпирические методы исследования – эксперимент, заключающийся в контроле образцов бетонов; измерение, заключающееся в получении и обработке электромагнитных сигналов, содержащих информацию о местоположении дефектов; математическое моделирование.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Двумерная математическая модель распространения акустического сигнала в образце для расчёта импульсных характеристик и временных реализаций откликов на основе метода механоэлектрических преобразований при использовании эхо-метода в условиях возбуждения радиоимпульсами произвольной формы.

2. Алгоритм расчета частотно-зависимого затухания акустического сигнала при прохождении по образцу.

3. Метод оценки местоположения и глубины залегания макродефектов в неметаллических материалах по временным характеристикам корреляционного анализа со скользящим окном.

4. Метод оценки глубины залегания макродефектов в неметаллических материалах по фазовым характеристикам аналитического представления отклика с привлечением математической модели.

**Личный вклад автора:** принимал участие в формулировании целей и задач исследований, в разработке математических моделей, проводил эксперименты и обработку данных измерений, обобщал полученные результаты, делал выводы. Принимал участие в написании статей, и представлял результаты исследований на всероссийских и международных конференциях.

**Достоверность результатов работы** подтверждается корректностью постановки задач и их физической обоснованностью, применением современной элементной базы и современной аппаратуры при разработке метода оценки местоположения и глубины залегания макродефектов в исследуемом объекте контроля, комплексным характером подхода к решению поставленных задач, достаточным объемом экспериментальных данных, полученных при проведении лабораторных исследований, обработкой экспериментальных данных с разработкой и использованием специальных компьютерных программ, получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

**Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 2019г.; международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2018г.; международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2018г., 2019г.»; Всероссийской научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле с международным

участием «Инновации в неразрушающем контроле», Новосибирск, 2017г.; международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы электронного приборостроения», Москва, 2018г.

Результаты работы апробировались и использовались при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ №19-19-00178 «Моделирование и разработка физико-технических основ метода и средств контроля локализации дефектов и их параметров в объеме материала по параметрам электромагнитной эмиссии» и РФФИ 19-72-10025 «Разработка физических основ метода контроля дефектности гетерогенных неметаллических материалов по параметрам электромагнитной эмиссии».

**Публикации:** По тематике диссертационного исследования опубликовано 5 работ, в т.ч. 4 публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

**Объем и структура диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 91 наименований и приложения. Работа содержит 121 страницу, 6 таблиц и 40 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность тематики исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы, обозначена структура научно-квалификационной работы.

**В первой главе** рассмотрены методы неразрушающего контроля неметаллических материалов, обоснован выбор предмета исследования. Представлен анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной методам контроля. Приведен анализ исследований явлений механоэлектрических преобразований в условиях напряженно-деформированного состояния образца и возбуждении образцов упругими механическими импульсами. Рассмотрены некоторые особенности метода механоэлектрических преобразований, в частности использование реверберации для накопления полезной составляющей сигнала, дифракционные явления как ограничивающий фактор применения метода для томографии макродефектов. Рассмотрено использование метода механоэлектрических преобразований для оценки напряженно-деформированного состояния материалов и оценки интегральной дефектности.

**Во второй главе** представлены методики проведения экспериментальных исследований, использованные при подготовке настоящей работы. Рассмотрены вопросы выбора излучателя для возбуждения образца. Обозначены проблемы, связанные со структурным шумом и рассмотрены способы минимизации помех на этапе проектирования измерительного тракта системы и выбора образцов контроля. Приведена схема исследовательской установки для изучения метода механоэлектрических преобразований.

Исследования выполнены с помощью разработанного макета экспериментальной установки, который позволяет возбуждать объект контроля серийно акустических импульсов и регистрировать электромагнитные отклики механоэлектрических преобразований. На рисунке 1 приведена структурная схема

установки. Лабораторная установка для анализа дефектов методом механоэлектрических преобразований состоит из высоковольтного усилителя (ВУ), компьютера, манипулятора-координатографа, устройства генерации и оцифровки (УГО) и системы излучатель-приёмник в виде блока возбуждения и съёма (БВиС). Для преобразования сигнала установка оснащена аналогово-цифровым и цифро-аналоговым преобразователями (АЦП и ЦАП). Для преобразования сигнала установка оснащена аналогово-цифровым и цифро-аналоговым преобразователями (АЦП и ЦАП).

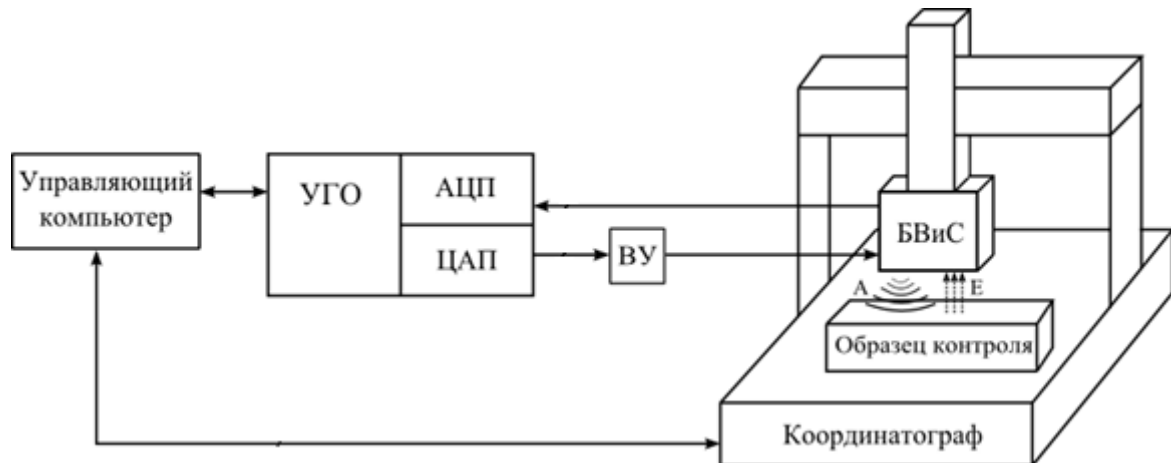


Рисунок 1 – Структурная схема установки.

Компьютер генерирует сигнал заданных параметров (форма, длительность, заполнение), усилитель формирует сигнал с повышенной амплитудой, сигнал излучается пьезоэлектрическим ультразвуковым излучателем в точке контакта с образцом, емкостной датчик электромагнитных сигналов принимает сигналы отклика, после чего они обрабатываются и визуализируются компьютером.

Координатограф позволяет позиционировать блок воздействия и съема над заданной областью контролируемого объекта. БВиС включает в себя пьезоэлектрический ударник и дифференциальный емкостный приемник. Ударник посылает в объект контроля серию акустических импульсов, форма которых определяется условиями эксперимента и генерируется с помощью специальной программы в Mathcad. Измерительный вход дифференциального емкостного приемника находится на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности образца и воспринимает полезный электромагнитный сигнал и внешние помехи. Контрольный вход того же приемника расположен на высоте 12 мм над измерительным и воспринимает в основном помеху. Благодаря этому удастся существенно понизить уровень внешних помех. Устройством генерации и оцифровки (УГО), выполненным на базе многоканального устройства сбора данных NI USB-6356 осуществляется генерация возбуждения и оцифровка электромагнитных откликов. Измерительный аналоговый канал оснащен усилителем и низко- и высокочастотными аналоговыми фильтрами для ограничения полосы частот аналогового тракта до уровня 1 кГц – 1 МГц. Выход цифро-аналогового преобразователя УГО подключен к входу высоковольтного усилителя (ВУ) для усиления сигнала и последующей передачи его на пьезоэлектрический ударник для возбуждения образца. Для повышения отношения сигнал/шум производилось многократное возбуждение образца (128 раз) и усреднение полученных откликов.

Приведено описание программы получения и первичной обработки сигнала, обоснован выбор образцов контроля, приводится описание образца и алгоритмов проведения измерений.

**В третьей главе** приводится решение задачи определения глубины залегания дефекта двумя методами сравнительного анализа: методом корреляционного анализа и фазовым методом.

Кроме того, в главе 2 было показано, что при использовании метода корреляционного анализа на точность оценки глубины залегания дефекта оказывает влияние степень искажения формы отраженного импульса.

На искажение формы отраженного импульса, в свою очередь, влияют геометрия системы «излучатель-дефект-приёмник», а также частотно-зависимое затухание зондирующего сигнала и дифракционные явления в окрестностях приёмника.

Для минимизации искажения сигнала необходимо оптимизировать спектр возбуждающего импульса.

Для оценки глубины залегания макродефектов были использованы два метода: метод корреляционного анализа и фазовый метод.

Проблема оценки глубины расположения макродефекта заключается в том, что в методе механоэлектрических преобразований приемник сигнала регистрирует не только отклик отраженного от дефекта сигнала, но также и начальный сигнал возбуждения. По этой причине создаются условия частичного наложения этих сигналов. Поэтому необходим поиск таких параметров отклика, по которым можно давать оценку глубины залегания дефектов в этих условиях при корреляционном анализе и при фазовом методе.

При использовании указанных методов анализа использовались не сами временные реализации, а их аналитические представления.

В случае применения корреляционного анализа использовались амплитудовременные характеристики аналитического сигнала, а в случае фазового метода – фазовременные.

Для формирования аналитического сигнала  $sh(t)$  из временного  $s(t)$  использовалось преобразование Гильберта по формуле:

$$sh(t) = s(t) + i \cdot \text{hilbert}(s(t)) \quad (1)$$

где  $\text{hilbert}()$  – функция преобразования Гильберта,  $i$  – мнимая 1.

Модуль  $sh(t)$  является огибающей временного сигнала отклика.

Фазовременная характеристика аналитического сигнала  $\varphi(t)$  рассчитывалась по формуле

$$\varphi(t) = \arctg\left(\frac{\text{hilbert}(\varphi(t))}{\varphi(t)}\right) \quad (2)$$

Корреляционный анализ производился по методу скользящего окна. Для этого на амплитудно-временной характеристике аналитического сигнала выбиралось начальное окно с длительностью несколько больше длительности импульса возбуждения, а затем производилось вычисление коэффициента корреляции между амплитудно-временными выборками начального окна и окна той же длительности при последовательном его смещении вдоль амплитудно-

временной временной выборки отклика. В результате этой процедуры формировалась корреляционная зависимость, по параметрам которой необходимо было дать оценку глубины расположения макродефекта.

Были смоделированы исходные радиоимпульсы заданной длительности и амплитуды с частотой заполнения 105 кГц и 140 кГц. Были также смоделированы сдвинутые относительно исходных импульсов радиоимпульсы той же длительности, но с заданной меньшей амплитудой. Суммарные исходный и сдвинутый импульсы послужили моделью отклика сигнала, отраженного от поверхности включения.

Были рассчитаны их огибающие с использованием преобразования Гильберта.

Для учета влияния на форму радиоимпульса переходных процессов пьезоэлектрического преобразователя в уравнение радиоимпульсов введено экспоненциальное нарастание радиоимпульсов в момент возбуждения и экспоненциальное его спадание после прекращения возбуждения с заданной постоянной времени (2 мкс).

С использованием скользящего окна была рассчитаны корреляционные зависимости для суммарных огибающих радиоимпульсов.

На рисунке 2 отображены огибающие радиоимпульсов (серые линии) и их корреляционные зависимости (черные линии) с частотой заполнения 105 кГц (слева) и 140 кГц (справа). На графиках обозначены вертикальными линиями моменты окончания импульса возбуждения (левая линия), также время завершения суммарного импульса (правая линия).

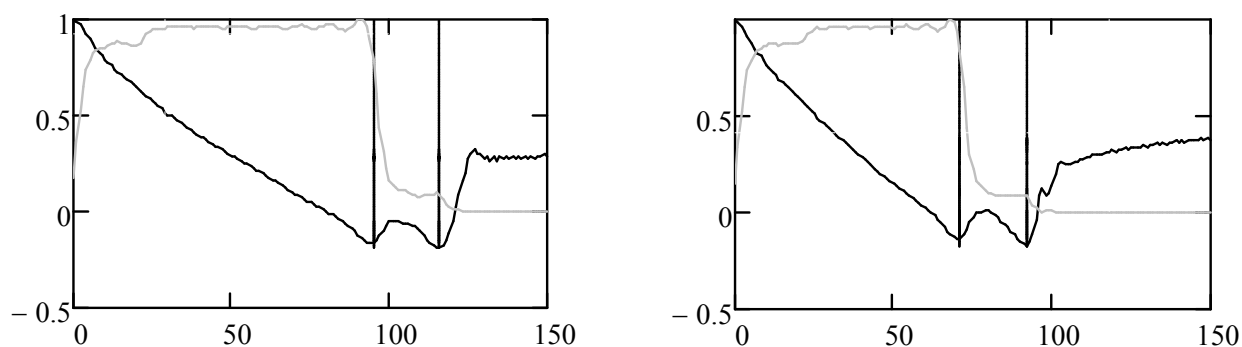


Рисунок 2 – Огибающие радиоимпульсов модельного сигнала отклика и их корреляционные зависимости для посылаемых сигналов частотой 105 кГц(слева) и 140 кГц(справа). По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Как видно из рисунков, отчетливо проявляются скачки в точках, где заканчивается импульс возбуждения, а также отраженный импульс. По временной разности скачков можно вычислить время  $t$  запаздывания сигнала отклика, а, следовательно, рассчитать глубину  $h$  искомого дефекта.

Было проведено сканирование образца по поверхности с шагом в 10 мм между соседними позициями сканирования.

На рисунке 3 представлены некоторые результаты сканирования и обработки сигнала корреляционным методом. На каждом графике серой линией отображены

огибающие радиоимпульса, сплошной линией корреляционные зависимости в заданных точках сканирования.

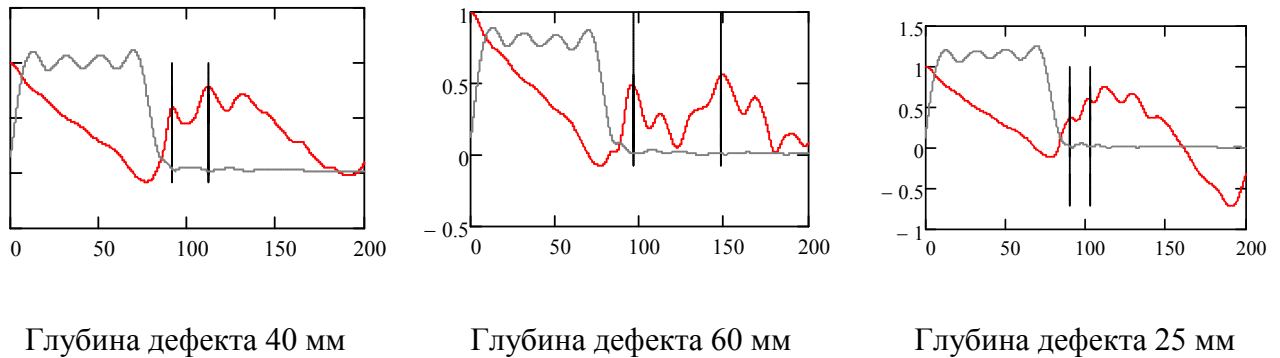


Рисунок 3 – Огибающие радиоимпульсов сигнала отклика(серые) и их корреляционные зависимости(красные). По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Показана принципиальная возможность оценки глубины залегания дефекта с использованием метода корреляционного анализа. Для повышения надежности указанного метода необходимы дальнейшие исследования.

Суть фазового метода заключается в том, временная реализация отклика радиоимпульса заданной частоты  $f$  преобразуется в аналитический сигнал. Затем вычисляются его фазовременная характеристика  $\varphi(t)$  (2) на заданном интервале времени.

Непосредственно использовать эту характеристику затруднительно из-за быстрого линейного нарастания фазы от времени при заданной частоте импульса возбуждения.

Поэтому для проведения анализа из фазовременной характеристики  $\varphi(t)$  вычитается линейная составляющая роста. Результатом является остаточная фазовременная характеристика  $\varphi_1(t)$ , которая используется для проведения анализа.

$$\varphi_1(t) = \varphi(t) - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t, \quad (3)$$

где  $f$  – частота заполнения радиоимпульса.

Схематично мы имеем наложение двух сигналов одинаковой длительности. Один сигнал является откликом акустического сигнала в момент возбуждения образца, другой – откликом отраженной от поверхности макродефекта акустической волны, сдвинутой на время ее прохождения до поверхности дефекта и отраженной в область приемника сигнала. Идея состоит в том, чтобы обнаружить скачки фазы в момент либо наложения этих откликов, либо в момент окончания действия суммарного отклика.

Ранее исследования были направлены на обнаружение момента наложения задержанного сигнала отклика и исходный акустический сигнал возбуждения. В Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета были проведены исследования с использованием фазового метода на кубических образцах бетона с отверстиями разной глубины. Исследования показали принципиальную

возможность обнаружение залегание дефекта на глубине 60 мм. На меньших глубинах надежных результатов не получено.

В настоящей работе было предложено регистрировать аномалии в изменении фазы в период окончания действия импульса возбуждения и завершения действия отклика.

Были смоделированы условия (рисунок 4), когда отраженный сигнал с амплитудой 0.3 от исходного совпадает по фазе с исходным и когда фаза отраженного сигнала повернута на угол  $90^\circ$ .

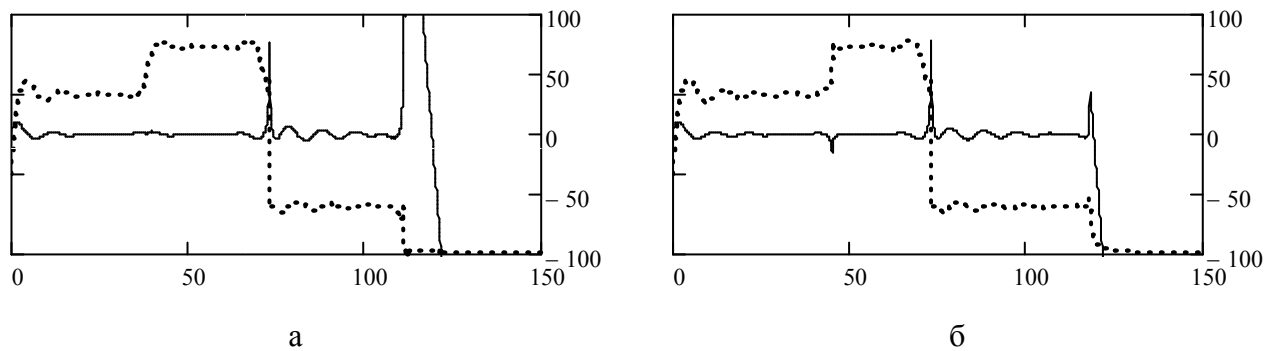
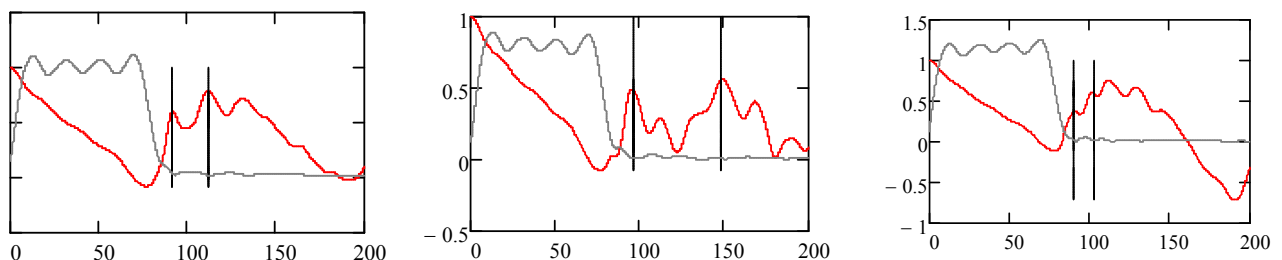


Рисунок 4 – Фазовые характеристики модели. Пунктирной линией нанесены огибающие полного отклика; сплошной линией обозначены мгновенные фазы фазовременной характеристики аналитического сигнала. а - фаза отраженного сигнала совпадает с фазой исходного, б – фаза отраженного сигнала повернута на угол  $90^\circ$ . По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

На рисунке 5 приведены огибающие радиоимпульса. Левые вертикальные линии отмечают длительность импульса, правые - суммы длительности импульса и времени двойного пробега сигнала возбуждения от источника до приемника, отраженного от дефекта. Следовательно, интервал между левыми и правыми вертикальными линиями характеризует глубину залегания дефекта. На каждом графике серой линией отображены огибающие радиоимпульса, сплошной линией - фазовые характеристики в заданных точках сканирования.



Глубина дефекта 40 мм

Глубина дефекта 60 мм

Глубина дефекта 25 мм

Рисунок 5 – Фазовые характеристики реальных сигналов. Пунктирной линией нанесены огибающие полного отклика; сплошной линией обозначены мгновенные фазы фазовременной характеристики аналитического сигнала. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что по кривым фазовых характеристик можно с той или иной степенью надежности оценивать глубину залегания дефектов. Одной из причин недостаточно высокой чувствительности метода фазовых характеристик является с нашей точки зрения большая разница в амплитудах исходного и отраженного сигнала отклика. Для повышения надежности оценки глубины залегания дефектов в настоящей работе был разработан разностный метод.

При использовании в методе механоэлектрических преобразований условия многократного возбуждения образца и усреднения полученных откликов удалось существенно повысить соотношение сигнал/шум как исходного сигнала, так и отклика. В связи с этим возникла возможность смоделировать акустический сигнал возбуждения, а затем вычесть его из реального исходного акустического сигнала. Остаточный сигнал содержит в себе отраженную составляющую отклика, а также структурный шум и контактные переходные характеристики системы поверхность образца – поверхность устройства возбуждения. В любом случае уровень разностного сигнала будет иметь существенно меньшее отличие от уровня отраженного сигнала, что создает условия повышения надежности использования метода фазовых характеристик для оценки глубины залегания макродефектов.

Анализ отличий прямоугольного электрического импульса возбуждения от, акустического сигнала, формируемого пьезоэлектрическим преобразователем позволил составить уравнение функции  $res$ , воспроизводящей форму акустического радиоимпульса:

$$res(t, tau, a, f, fi) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - fi) \cdot (\Phi(t) \cdot ((1 - \exp(\frac{-t}{tau})) - \Phi(\frac{-t+q}{tau}) \cdot (1 - \exp(\frac{-t+q}{tau})))) \quad (4)$$

где  $t$  – время;  $tau$  – постоянная времени;  $f$  – частота;  $fi$  – фаза;  $\Phi( )$  – функция Хэвисайда;  $q$  – длительность радиоимпульса;  $a$  – амплитуда.

В среде Mathcad была составлена программа, позволяющая подгонять параметры математической модели (амплитуду, постоянную времени, фазу) к параметрам реального начального акустического сигнала.

Подогнанная таким образом модель вычиталась из реального сигнала. Остаточный сигнал подвергался обработке для вычисления фазовых характеристик.

Примеры сигналов на рисунке 6.

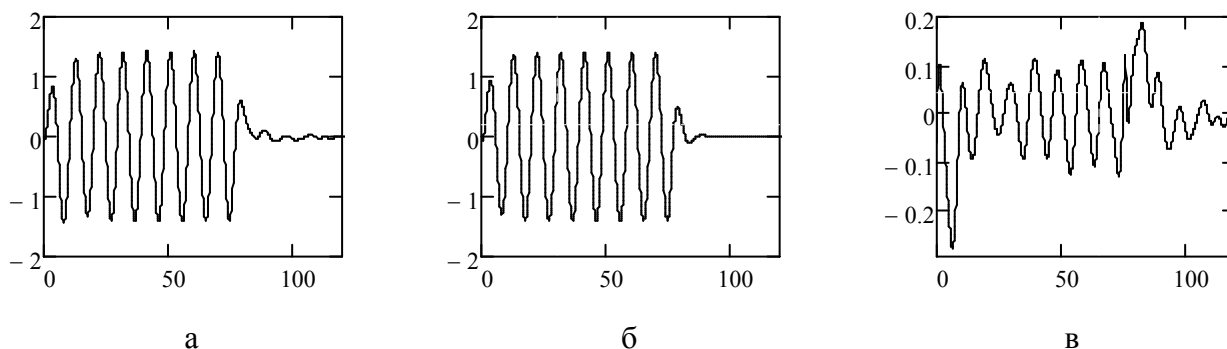


Рисунок 6 – модельный сигнал с учётом переходного процесса преобразователя(а), реальный сигнал, полученный сразу после возбуждения(б) и разностный(в) сигнал, полученный при вычитании первых двух. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Были вычислены фазовые характеристики разностных сигналов в каждой точке сканирования для радиоимпульсов с частотой 105 кГц и построены графики, показательные примеры приведены на рисунке 7.

Сплошными линиями обозначены графики фазовых характеристик разностных сигналов в областях залегания дефектов на глубине 25 мм, 40 мм и 60 мм. На каждом рисунке серой линией отображен реальный отклик. Лево́й вертикальной линией отображено время двойного пробега отраженной от дефекта акустической волны, характеризующей глубину залегания дефекта, средней линией – длительность импульса возбуждения, правой линией - длительности отклика.



Рисунок 7 – Фазовые характеристики разностных сигналов. Серым обозначены огибающие радиоимпульсов сигналов откликов, черным – мгновенная фаза разностного сигнала. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Анализ фазовых характеристик для разностных сигналов показал следующее.

В целом для района с дефектом глубиной 25 мм в интервале времени между завершением действия импульса возбуждения и завершением отклика имеют место характерные перегибы, позволяющие однозначно вычислять глубину залегания дефекта. Имеются также характерные изменения формы фазовой характеристики в области начала действия отраженного сигнала, что позволяет непосредственно вычислять глубину залегания дефекта.

В районе залегания дефекта с глубиной 40 мм в интервале времени с момента окончания действия импульса возбуждения и до окончания действия отклика имеют место характерные двойные перегибы, также позволяющие определить глубину залегания дефекта. В районе начала действия отраженного сигнала имеется характерный зубец, что, может быть связано с упомянутыми выше собственными частотами устройства возбуждения. Косвенным подтверждением этого является форма огибающей отклика в данной позиции.

Для района залегания дефекта на глубине 60 мм характерным является монотонное убывание фазовой характеристики, в некоторых позициях на фоне монотонного убывания имеются локальные перегибы.

Проведенные исследования показали перспективность использования метода фазовых характеристик для оценки глубины залегания дефектов.

**В четвертой главе** описывается разработка математических моделей метода механоэлектрических преобразований. Рассмотрены вопросы создания

математической модели формирования электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении образца, двумерной математической модель распространения волны упругих деформаций по образцу и модели учёта частотно-зависимого затухания колебаний, из-за чего происходит изменение спектрального разложения сигнала при прохождении по образцу.

Двумерная математическая модель предназначена для оценки возможности использования метода МЭП при проведении томографических исследований: определения глубины залегания макродефекта, его горизонтальных координат.

Проведенные ранее экспериментальные исследования показали, что на уровень отклика, обусловленного отражением акустической волны возбуждения от поверхности макродефекта при одностороннем приеме, оказывают влияние следующие факторы:

1. Длины лучей акустической волны возбуждения от элементов поверхности источника сигнала возбуждения до элементов поверхности макродефекта и углов падения на эту поверхность.
2. Длины лучей, отраженных от элементов поверхности макродефекта до элементов поверхности приемника сигнала и углов падения на эту поверхность.
3. Геометрические размеры отражающей поверхности макродефекта.
4. Геометрические размеры поверхности излучателя акустической волны возбуждения и приемника отклика.

Указанные факторы позволяют определять горизонтальные координаты расположения макродефекта при сканировании системой контроля по образцу.

Для оценки глубины залегания макродефекта перспективными являются методы сравнительного анализа исходного импульса возбуждения с отраженным от поверхности дефекта.

В этом случае необходимо оценивать степень искажения формы отраженного импульса относительно исходного.

Искажение формы импульса определяются следующими факторами:

1. Вследствие протяженности источника акустического возбуждения, приемника сигнала и поверхности макродефекта происходит сложение сдвинутых во времени элементарных акустических сигналов отражения от поверхности макродефектов.
2. Происходит частотно-зависимое затухание акустической волны возбуждения.
3. Имеют место дифракционные явления при взаимодействии акустической волны возбуждения с макродефектом, что приводит к тому, что уровень отражения спектральных составляющих акустической волны возбуждения определяется соотношением геометрических размеров макродефекта с длинами волн частотных составляющих спектра импульса возбуждения.

Алгоритм расчета отклика заключается в следующем: Лучи из каждого элемента поверхности излучателя падают на заданный элемент поверхности дефекта. Убывание уровня сигнала вдоль луча определяется коэффициентом  $k$  передачи сигнала по формуле:

$$k = \frac{k_0}{r} \cdot \cos(\varphi) \quad (5)$$

Или

$$k = \frac{k_0}{r^2} \cdot |x_1 - x_2| \quad (6)$$

где  $k_0$  – коэффициент связи,  $x_1$  – горизонтальная координата начала луча  $r$ ;  $x_2$  – горизонтальная координата конца луча  $r$ ,  $\varphi$  – угол наклона луча, излучаемого элементом поверхности источника акустического возбуждения и падающего на элемент поверхности макродефекта.

От каждого элемента дефекта происходит отражение всех элементарных лучей, испущенных поверхностью излучателя. Эти отраженные лучи взаимодействуют с источниками МЭП, находящимися вблизи приемника. Рассчитывались расстояния, которые пробегает каждый луч между элементом поверхности источника и элементом поверхности макродефекта, а также поверхностью макродефекта и приемника. Сигналы откликов от каждого луча, попадавших в один и тот же временной интервал, суммировались. Каждый элементарный сигнал отклика рассчитывался, исходя из сферичности акустической волны, т.е. учитывалось убывание акустической волны обратно пропорционально расстоянию. Рассчитывалось также время запаздывания прихода лучей к приемнику для формирования интегральной временной зависимости отклика. Суммирование всех лучей формирует импульсную характеристику отклика при заданной конфигурации системы излучатель – дефект – приемник.

В соответствии с предложенной моделью были рассчитаны импульсные характеристики  $imp(t)$  для глубин залегания дефектов 25 мм, 40, мм и 60 мм, отображенные на рисунке 8.

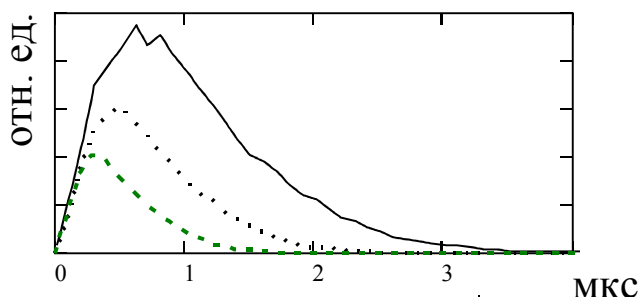


Рисунок 8 – Импульсные характеристики откликов на глубине залегания дефектов 25 мм (сплошная линия), 40 мм (точки), 60 мм (пунктирная линия)

Как следует из рисунка, длительности импульсных характеристик уменьшаются с ростом глубины залегания дефекта

Были рассчитаны импульсные характеристики для трех уровней залегания макродефектов: 25мм, 40 мм и 60 мм. Кроме того, рассчитывались импульсные характеристики откликов при отражении импульса возбуждения от дна образца (100 мм).

Для решения задачи определения местоположения макродефекта, а также возможной оценки его линейных размеров в работе рассмотрены отклики при различных частотах и длительностях импульса возбуждения.

При этом не учитывалось частотно-зависимое затухание.

На рисунке 9 отображены приведенные отклики при возбуждении образца прямоугольным радиоимпульсом с частотой 100 кГц длительностью в 1 период в

зонах дефектов глубиной 25мм (точки), 40 мм (пунктирная линия), 60 мм (штрих-пунктирная линия) и форма импульса возбуждения (жирная сплошная линия).

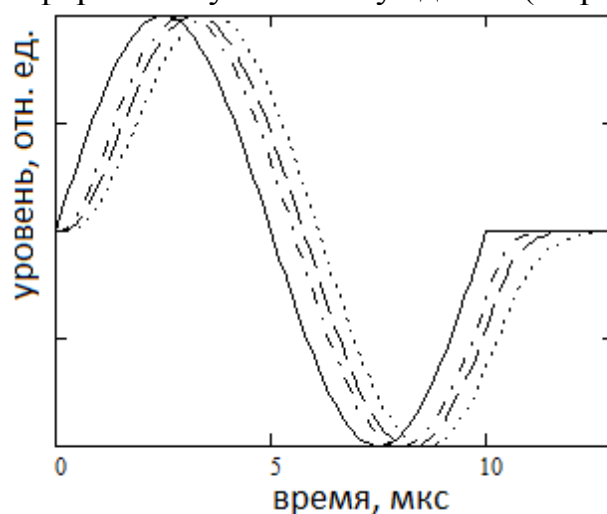


Рисунок 9 – Приведенные отклики при возбуждении образца прямоугольным радиоимпульсом с частотой 100 кГц длительностью в 1 период в зонах дефектов глубиной 25мм (точки), 40 мм (пунктирная линия), 60 мм (штрих-пунктирная линия) и форма импульса возбуждения (сплошная линия)

Как следует из рисунка, имеет место возрастание длительности отклика с уменьшением глубины залегания дефекта. Формы сигналов откликов в той или иной мере искажены относительно импульса возбуждения. Из теории следует, что длительность отклика складывается из длительности исходного импульса (в нашем случае период соответствующей частоты) и длительностью характеристики, с которой осуществляется свертка. Поэтому длительность отклика затянута по отношению к исходному импульсу.

Длительность импульсной характеристики при лучевом приближении распространения акустической волны зависит как от глубины расположения дефекта, от поверхности которого отражается волна возбуждения, так и от его линейных размеров, а также от суммы линейных размеров источника возбуждения, приемника и зазора между ними.

Поэтому в целом разность между длительностью отклика и длительностью импульса возбуждения является индикатором глубины расположения дефектов.

Характерным является то, что с увеличением глубины залегания дефекта уменьшается растягивание сигнала отклика, а форма отклика приближается к форме сигнала возбуждения.

Особенным образом формируется сигнал отклика при отражении акустической волны возбуждения от дна образца, что обусловлено относительно большой поверхностью, от которой отражается сигнала акустической волны возбуждения.

Рассмотрим поведение откликов в спектральной области. На рисунке 10 отображены фрагменты амплитудно-частотных характеристик (до первого перегиба) откликов при воздействии импульса частотой 100 кГц для глубин дефектов (25, 40, 60) мм, а также АЧХ импульса возбуждения.

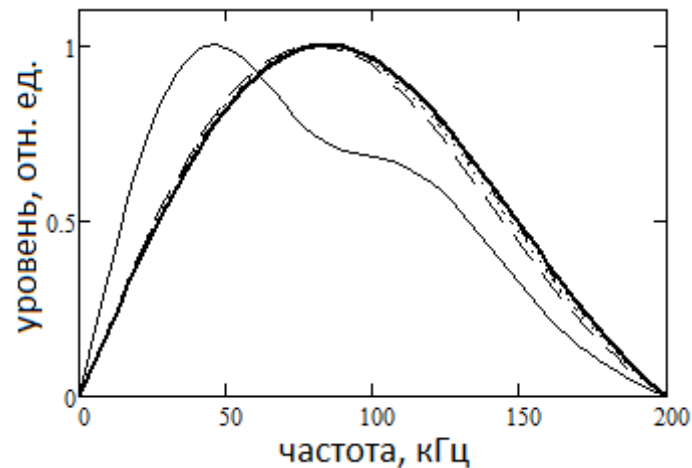


Рисунок 10 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрихпунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 100 кГц

Как видно из рисунка, на частоте 100кГц все линии АЧХ практически сливаются. Вместе с тем видно, что АЧХ отклика при отражении от дна образца имеет особенность, которая, вероятно обусловлена проявлением интерференции за счет наложения акустических волн, длины пробега которых превышают интервал когерентности.

На рисунках 11 и 12 показаны АЧХ откликов и импульса возбуждения для тех же глубин для частот 300кГц и 600 кГц.

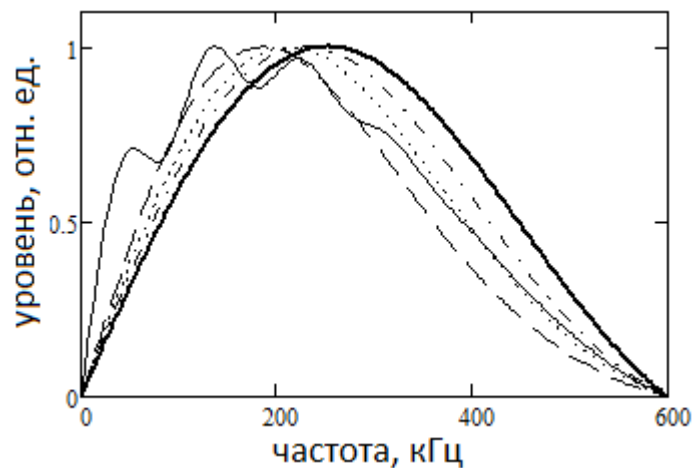


Рисунок 11 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрих-пунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 300 кГц

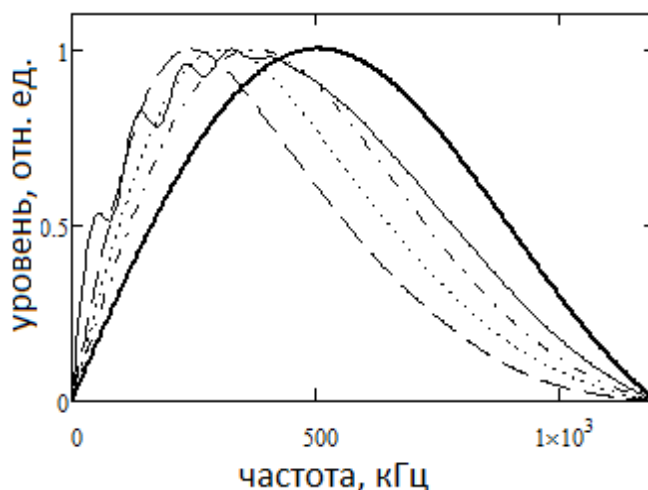


Рисунок 12 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрих-пунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 600 кГц

Из рисунка 12 следует, что на частоте 300 кГц максимумы АЧХ откликов относительно АЧХ исходного возбуждения закономерно заметно смещаются в область низких частот с уменьшением глубины залегания дефекта. Характер отклика от дна образца становится более сложным.

И, наконец, на частоте 600 кГц проявление смещения максимумов АЧХ существенно возрастают.

Таким образом, для более точной оценки глубины залегания дефекта необходимо повышать частоту возбуждения.

По импульсным характеристикам можно рассчитать отклики при воздействии на образец импульса заданной формы.

В настоящей модели в качестве возбуждающего импульса использовались радиоимпульсы (100, 300, 600) кГц длительностью в 1 период.

Частота генерируемого возбуждения должна лежать в некотором подходящем для исследования диапазоне, который ограничен с обеих сторон по следующим соображениям: с одной стороны, с ростом частоты проявляется эффект частотно-зависимого затухания. Волны высокой частоты при прохождении по образцу значительно уменьшают свою амплитуду. В реальности это означает, что сигнал, имея разные частотные составляющие, изменяется в сторону более низкочастотного, поэтому целесообразно не пользоваться сигналами высокой частоты. С другой стороны, при низких частотах значительные искажения вносят явления дифракции. Низкочастотные (длинноволновые) сигналы не могут быть использованы для обнаружения небольших дефектов, поскольку не отражаются от них.

По этой причине базовая частота для сигнала возбуждения должна лежать в определённом частотном диапазоне для того, чтобы сигналы откликов были информативны.

Разработка алгоритма частотно-зависимого захвата:

Волна возбуждения  $s(x)$  затухает по закону:

$$s(x) = \frac{s_0}{x} \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (7)$$

где  $s_0$  – начальная интенсивность волн возбуждения;  $x$  – путь волны;  $\alpha$  – коэффициент затухания. Коэффициент  $\alpha$  на круговой частоте  $\omega$  гармонического сигнала описывается выражением:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot \eta}{3 \cdot \rho \cdot v^3} \quad (8)$$

где  $\eta$  – вязкость материала;  $\rho$  – плотность материала;  $v$  – продольная скорость звука.

Как следует из формулы (8) коэффициент затухания для разных гармонических составляющих будет разным. Следствием этого является то, что форма отклика, включающая в себя набор гармоник, исказится. Поэтому использование корреляционного анализа, а также метода оптимальной фильтрации для определения местоположения дефекта на фоне малого отношения сигнал/шум может быть неэффективными.

Принципиально задача решается предварительным разложением сигнала возбуждения на гармоники, а затем производится восстановление сигнала во временной с учетом изменения амплитуд и фаз гармонических составляющих при распространении сигнала в диссипативной среде, которые с учетом потерь при распространении в диссипативной среде.

В отличие от метода решения задачи искажения импульса возбуждения, обусловленного частотно-зависимым затуханием путем разложения на затухающие гармоники, а затем восстановления временной реализации, нами предложен другой подход, позволяющий избежать разложения сигнала на гармоники.

В его основе лежит предположение, что энергия акустической волны рассеивается с расстоянием в тепловую за счет внутреннего трения пропорционально скорости изменения ее формы. Была разработана программа расчета формы волны возбуждения при ее продвижении на заданное расстояние. Временная выборка формы волны  $f_i(t)$  при ее смещении на 1 периода дискретизации показана формулой 3.

$$f_{i+1}(t) = f_i(t) - \frac{f_i(t)}{dt} \cdot k \quad (9)$$

где  $k$  – множитель, определяющий скорость изменения формы временной реализации.

Расчет производился с использованием метода рекурсии. Для оценки величины  $k$  проводились следующие эксперименты.

С использованной экспериментальной установки формировались по 2 прямоугольных радиоимпульсы с интервалом в 1 мс частотой 105 кГц, производилось многократное акустическое возбуждение образца из бетона, затем полученные данные усреднялись и результаты регистрировались.

На рисунке 13 показана временная реализация усредненных откликов.

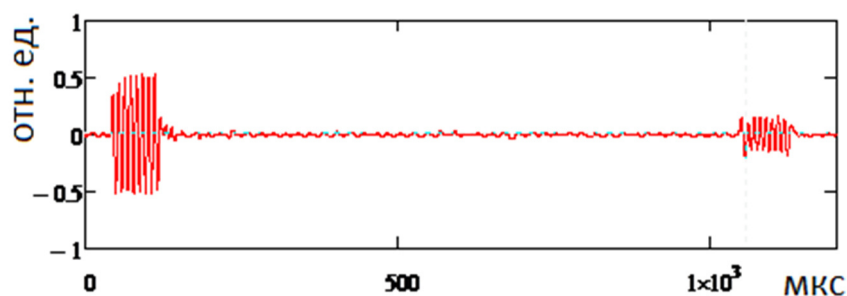


Рис. 13 – Временная реализация двух прямоугольных радиоимпульсов одинаковой амплитуды частотой 105 кГц сдвинутых относительно друг друга на 1 мс

Большой на графике импульс запущен на 1 мс позже меньшего. Уровень импульса в начале координат соответствует начальному значению импульса возбуждения. Замеры показали, за это в течение 1 мс уровень акустической волны уменьшился в 3.3 раза.

Для расчета коэффициента  $k$  в по формуле (3) в алгоритм расчета подставлены временная реализация акустического импульса возбуждения в начальный момент времени., затем подбором коэффициента  $k$  уровень расчетного приводился к реальному уровню отклика сигнала через 1 мс после прохождения волны в образце.

Значение  $k$  составило 0.07.

Аналогичным образом был проведен эксперимент с прямоугольными радиоимпульсами с частотным заполнением 140 кГц. На рисунке 14 показаны временные реализации откликов от двух радиоимпульсов, сдвинутых один относительно другого также на 1 мс.

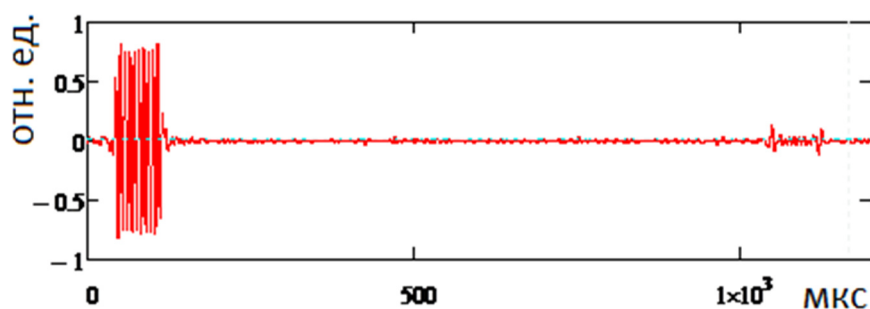


Рисунок 14 – Временная реализация двух прямоугольных радиоимпульсов одинаковой амплитуды частотой 140 кГц сдвинутых относительно друг друга на 1 мс

Замеры показывают, что в течение 1 мс с момента движения акустической волны в образце ее уровень уменьшился в 24 раза.

Путем подбора в соответствии с предыдущей процедурой для радиоимпульса 140 кГц коэффициент  $k$  оказался равным 0.09.

Как видно, коэффициент  $k$  для волны с частотой 140 кГц несколько отличается от такого же коэффициента для волны с частотой 105 кГц

Возможной причиной этому является влияние расхождения волны из-за ее сферичности, которое в данных расчетах учтены не были.

Для моделирования искажения радиоимпульсов за счет частотно-зависимого затухания были программным образом сформированы прямоугольные радиоимпульсы с несущими частотами (150, 250, 500) кГц с длительностями 25 периодов соответствующих частот. Был задан диапазон расстояний  $s$  пробега волны каждой частоты, который рассчитывался по формуле

$$s_j = 100 \cdot j \cdot v \quad (10)$$

где  $v$  – скорость звука в материале;  $j=0..10$ .

Были рассчитаны затухания волн в точках  $s_j$  (рисунок 15).

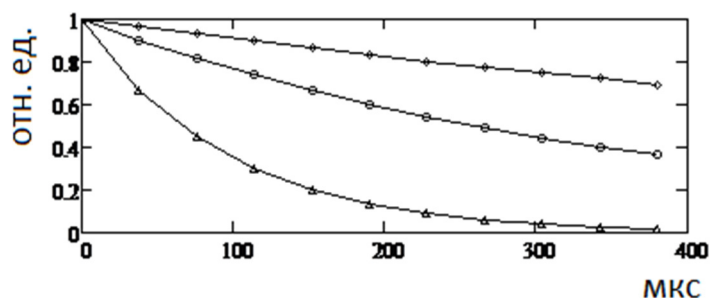


Рисунок 15 – Зависимость убывания уровней радиоимпульсов с расстоянием. Верхний график соответствует частоте 150 кГц, средний - 250 кГц, нижний – 500 кГц

Было произведено моделирование степени искажения широкополосного сигнала возбуждения. В качестве широкополосного сигнала был взят 1 период частоты 500 кГц. По указанной выше методики были рассчитаны формы откликов при прохождении волной пути (40, 80, 120, 240) мм.

На рисунке 16 отображены формы сигналов откликов после прохождения указанных расстояний.

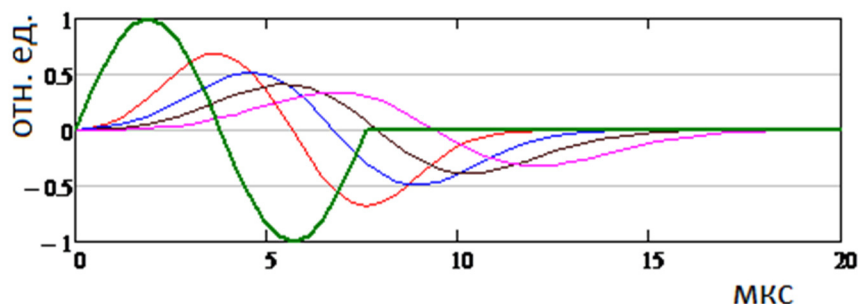


Рисунок 16 – Изменение формы импульсов с расстоянием. Формы сигналов при прохождении волной в форме периода гармоникой частотой 500 кГц образца. Графики убывающего уровня соответствуют пути в (40, 80, 120, 240) мм

Происходит существенное растягивание импульса возбуждения, что требует внесения коррективов при использовании корреляционного анализа.

Необходимо иметь в виду, что имеется еще одна проблема, также связанная с частотно-зависимым затуханием при отражении волны от макродефекта. Закон отражения волны в направлении приемника в том случае, когда размеры макродефекта соизмеримы с длиной волны возбуждения, не подчиняются законам геометрической оптики. В этом случае необходимо учитывать огибание макродефекта длинноволновой составляющей волны. Уравнение рассеянной волны  $J_{sc}$  на включении в виде сферы описывается формулой Релея:

$$J_{sc} = J_{exc} \cdot \frac{\omega^4 \cdot a^6}{9 \cdot v^4 \cdot r^2} \cdot (1 + 1.5 \cdot \cos \alpha)^2 \quad (11)$$

где  $J_{exc}$  – волна возбуждения;  $\omega$  – круговая частота волны возбуждения;  $v$  – скорость звука в материале;  $a$  – радиус сферы;  $r$  – расстояние от источника возбуждения до сферы;  $\alpha$  – угол рассеяния.

Из формулы следует, что рассеиватель для отраженной волны выступает в роли высокочастотного фильтра.

На основании экспериментальных исследований и моделирования процесса частотно-зависимого искажения формы волны возбуждения можно сделать вывод о необходимости оптимизации выбора спектра частот возбуждающего импульса, в зависимости от глубины залегания макродефекта и его линейного размера.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**В приложениях А-В** представлены копии акта о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс и акта о внедрении результатов работы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

1. Разработана одномерная математическая модель, позволяющая показать возможность использования метода корреляционного анализа для оценки глубины залегания макродефекта.

2. Проведены экспериментальные исследования при использовании метода корреляционных характеристик для оценки глубины залегания торцов поверхности макродефектов в виде глухих отверстий разной глубины, которые показали потенциальные возможности метода.

3. Разработана математическая модель, которая показала возможность использования фазового метода для оценки глубины залегания макродефектов.

4. Экспериментальная проверка показала принципиальную возможность использования фазового метода.

5. На основании этих расчетов была разработана уточненная математическая модель, позволяющая рассчитывать временную характеристику паразитного сигнала с учетом переходной характеристики устройства возбуждения и вычитать ее из реальной для повышения чувствительности фазового метода. Использование разностного метода позволило существенно повысить надежность определения глубины залегания.

6. Была разработана двумерная математическая модель, позволяющая рассчитать импульсные характеристики сигнала отклика с использованием размеров поверхности источника и приемника сигнала, а также отражающей поверхности макродефекта для анализа степени искажения сигнала отклика.

7. Был разработан алгоритм расчета частотно-зависимого затухания по временным характеристикам (подтвержденный экспериментально), что позволило существенно уменьшить трудоемкость расчета при использовании частотных характеристик.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

### *Публикации в научных изданиях, индексируемых в WoS и Scopus*

1. **Laas R.** Possibility of evaluating a depth of defects as a hole in a composite dielectric sample by the parameters of electric response to pulse mechanical excitation / Khorsov P., Surzhikov A., Surzhikov V., Laas R. // Key Engeneering materials – 2018 – 781–p.155-158.
2. **Laas R.A.** Calculation of macrodefects coordinates in dielectric specimens on the two-dimensional mathematical model of mechanoelectric transformations method/R.A. Laas, P. N. Khorsov and A. P. Surzhikov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018 – V.457 – p.6.
3. **Laas R.** The Application of Reverberation in Method of Mechanoelectrical Transformations for Estimation of Stress-Strain State in Solid Dielectrical Matter/ Khorsov, P., Laas, R., Surzhikov, A.P.//Material Science Forum – 2019 – 970 – 47–54.
4. **Laas R.A.** Two-Dimensional Ray Mathematical Model of Mechanoelectric Transformations Method for Location of Macrodefects Identification in Solid Dielectric Structures/ Laas R.A., Khorsov P.N., Surzhikov A.P., Bepalko A.A., Gyngazov A.S., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K // Bulletin of the Karaganda University, physics series – 2020 – №2(98) – 32-42.

### *Публикации в других научно-технических изданиях*

1. **Лаас Р.А.** О возможности использования метода механоэлектрических преобразований для локализации макродефектов в диэлектрических композитных материалах/ Хорсов П.Н., Лаас Р.А., Болатбекова Д.Г. // . – Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения –2018 – т.18 № 1 – 58-61.