

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

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук, профессор
Суржиков Анатолий Петрович

Томск - 2021

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Неразрушающие методы контроля Неметаллических материалов.	9
1.1 Ультразвуковая дефектоскопия.....	9
1.1.1 Теневой метод	10
1.1.2. Зеркальный метод	11
1.1.3. Метод реверберации.....	11
1.2 Акустическая эмиссия	12
1.3 Электромагнитная эмиссия.....	13
1.4 Метод механоэлектрических преобразований.....	14
1.4.1 Локализация дефектов в виде сколов и отверстий мультисенсорной системой контроля	17
1.4.2 Явление реверберации при реализации метода механоэлектрических преобразований	20
1.4.3 Дифракционные явления при взаимодействии акустической волны возбуждения с поверхностью макродефекта	26
1.4.4 Методы обработки сигналов.....	30
Выводы по главе 1.....	32
ГЛАВА 2. Методика экспериментальных исследований	35
2.1 О выборе типа излучателя для ультразвуковых волн	35
2.2 Проблемы, связанные со структурным шумом	40
2.3 Описание аппаратного комплекса.....	44
2.2 Описание программы работы установки.....	48
2.4 Образец.....	50
2.6 Параметры измерений	51
2.6 Выводы по главе 2.....	53
ГЛАВА 3. Методы численной оценки глубины залегания макродефектов ...	54
3.1 Оптимизация спектра возбуждения	54
3.2 Использование метода корреляционного анализа для численной оценки глубины залегания дефекта.....	60
3.2.1 Математическая модель корреляционного анализа.....	60
3.2.2 Анализ корреляционных зависимостей по экспериментальным данным	64

3.3 Использование фазового метода для численной оценки глубины залегания макродефектов.....	68
3.3.1 Модельный расчет фазовых характеристик.....	68
3.3.2 Анализ фазовых характеристик по экспериментальным данным. ...	72
3.4 Разностный метод оценки глубины залегания дефектов по фазовым характеристикам.....	75
3.5 Выводы по главе 3.....	80
ГЛАВА 4. Математические модели метода механоэлектрических преобразований.....	82
4.1. Математическая модель формирования электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении образца	82
4.2 Двумерная математическая модель.....	84
4.3. Разработка модели частотно-зависимого затухания	99
4.4 Выводы по главе 4.....	105
Выводы	107
Список использованных источников	110

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. 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 выполняют двойные электрические слои на границах раздела неоднородных материалов или включения, обладающие пьезоэлектрическими свойствами.

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.

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.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести предварительные исследования местоположения дефектов в виде отверстий в исследуемом образце из бетона с использованием сканирующей системы контроля на основе МЭП.
2. Разработать математическую модель для исследования искажения формы откликов от геометрических характеристик системы «излучатель-объект контроля-приемник сигнала».
3. Промоделировать импульсные характеристики откликов в зависимости от параметров системы контроля.
4. Разработать алгоритм расчета частотно-зависимого затухания.
5. Разработать методы оценки глубины залегания макродефекта с использованием фазовых характеристик и корреляционного анализа откликов при импульсном возбуждении образца.

Научная новизна

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

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 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.

Достоверность научных результатов 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.

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.

Научно-практическая значимость.

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.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на конференциях российского и международного уровней: V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 2019г.; «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2016г.; «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2018г., 2019г.» Инновации в неразрушающем контроле», Новосибирск, 2017г.; «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 том числе 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 наименования и приложения. Работа содержит 121 страницу, 6 таблиц и 40 рисунков. Приложения – 4 страницы.

ГЛАВА 1. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Особенность данной работы заключается в разработке неразрушающего метода контроля неметаллических материалов. С этих позиций методы, применяемые исключительно для работы с металлическими материалами (магнитные, вихретокового контроля и т.п.), следует исключить из рассмотрения. Также исключаются из рассмотрения и рентгеновские методы контроля качества объектов в связи с высокой проникаемостью такого излучения и его опасным влиянием на здоровье человека.

Из наиболее распространенных методов контроля неметаллических материалов следует остановиться в данном разделе работы на ультразвуковых методах, методах акустической и электромагнитной эмиссии, а также методе механоэлектрических преобразований. Последнему уделено основное внимание.

1.1 Ультразвуковая дефектоскопия

Идея ультразвуковой дефектоскопии достаточно проста, в её основе лежит тот же физический принцип, что и в процессе обычного зрения: сигнал, сгенерированный источником, взаимодействует с объектом наблюдения, затем мы регистрируем результат этого взаимодействия. В случае со зрением сигналом является электромагнитная волна – свет – которая может быть сгенерирована множеством разных источников, от солнца и до галогенных ламп. Свет отражается от поверхности объекта наблюдения и регистрируется приёмником, которым в данном случае является глаз. Принятый сигнал анализируется мозгом и в результате этого анализа мы видим изображение. В случае с ультразвуковой диагностикой, источник генерирует ультразвуковую волну, которая так же взаимодействует с объектом контроля и может быть зарегистрирована, проанализирована и представлена в виде информации – скана, изображения, 3-Д модели или же просто набора необходимых

параметров. С момента появления ультразвуковой дефектоскопии, предложенной Сергеем Яковлевичем Соколовым [1] в 1928 году, возникло множество различных методов регистрации и анализа сигнала, получаемого в результате исследования.

В 1928 году С.Я. Соколов впервые продемонстрировал возможность использования ультразвуковых волн для диагностики металлов, предварительно доказав, что ультразвук распространяется без отклонений в однородных металлах. В таком случае дефекты, которые могут находиться в однородных металлических структурах, должны отражать этот сигнал или же искажать его.

В процессе развития техники появилась возможность измерять не только отражённый сигнал, но и рассеянный. На сегодняшний день существует несколько методов использования ультразвукового излучения в дефектоскопии, которые отличаются взаимным расположением излучателя и приёмника, а также параметрами измеряемых ультразвуковых откликов.

1.1.1 Теневой метод

Теневой метод основан на явлении уменьшении амплитуды проходящего через образец сигнала при наличии в нём дефектов [2]. Источник и приёмник располагаются друг напротив друга с разных сторон образца. В случае отсутствия дефектов приёмник регистрирует небольшое уменьшение интенсивности принимаемого сигнала вследствие потерь энергии ультразвукового пучка при прохождении толщи материала из-за геометрического расхождения пучка и затухания волн в материале. Наличие дефекта на пути распространения ультразвуковых волн характеризуется значительным уменьшением интенсивности из-за образования акустической тени на приёмнике. Главными плюсами теневого метода являются его помехоустойчивость и слабая зависимость изменения амплитуды от пространственной ориентации дефекта. Однако при этом метод не позволяет

точно определить пространственное расположение дефекта, не даёт оценить его размеры. Другой проблемой является необходимость двустороннего доступа к объекту контроля, что не всегда является возможным.

При той же компоновке оборудования теневой метод можно улучшить, если регистрировать не только факт уменьшения интенсивности сигнала, но и время его прохождения. При наличии дефекта в структуре время прохождения ультразвукового пучка будет выше из-за огибания дефекта. Временной теневой метод эффективен при дефектоскопии материалом с большим рассеянием ультразвуковых колебаний, например, бетонов.

1.1.2. Зеркальный метод

Зеркальный метод основан на регистрации отражённого от дефекта сигнала. Он сравнивается с сигналом, отражённым от дальней поверхности образца (донной поверхности). Использование такого метода позволяет эффективно выявлять вертикальные дефекты. Используются два преобразователя, один из которых является передатчиком, второй – приёмником, оба расположены с одной стороны от объекта контроля. Существует несколько вариантов, например, «тандем» предназначен для поиска вертикально расположенных дефектов.

1.1.3. Метод реверберации

Реверберация – затухание звука в объёме образца со временем. Наличие дефекта в этом объёме увеличивает время затухания. Преобразователь в этом случае является и излучателем, и приёмником одновременно. Измеряется время затухания импульсов в различных точках над поверхностью объекта контроля, время затухания увеличивается при наличии дефекта.

Существуют также многочисленные методы, основанные на комбинировании принципов ультразвуковой диагностики и методов для решения нетривиальных практических задач. Например, для контроля

многослойных изделий может использоваться комбинированный метод, основанный на совмещении теневого и реверберационного, что позволяет определить и глубину залегания, и положение и линейные размеры дефектов [3].

Все вышеперечисленные акустические методы относятся к активным – то есть методам, при которых используется внешний источник сигнала, который посылается в образец. Существует множество методов для возбуждения акустической волны в образце. В основном для генерации используют ударное физическое воздействие, например, при помощи специальных бойков или металлических шариков. Также часто используются пьезоэлектрические преобразователи. Они позволяют лучше контролировать параметры сигнала и помогают избежать реверберационных помех от механического воздействия [4]. Однако, существуют и пассивные акустические методы, например, метод акустической эмиссии. [5]

1.2 Акустическая эмиссия

При деформациях в твёрдых диэлектрических структурах возникают волны напряжений, которые могут быть зарегистрированы различными акустическими датчиками. Явление получило название акустической эмиссии и уже глубоко изучено. Классическими примерами источников акустической эмиссии являются процессы деформирования, связанные с ростом дефектов, например, трещин или зон пластической деформации [5-6].

Акустическая эмиссия (АЭ) обусловлена прерывистым, скачкообразным развитием дислокационных процессов. Метод акустической эмиссии так же используется для определения координат дефекта. Поскольку сигнал генерируется при росте трещины, координаты зоны роста в данном случае и принимаются за координаты источника акустической эмиссии.

Полученный сигнал можно анализировать широким спектром методов, как амплитудных, так и временных. Часто используется их комбинация. С

одной стороны, амплитуда полученного сигнала содержит в себе информацию о расстоянии до дефекта, однако применение метода затруднено сложным влиянием структуры композиционных материалов и формы изделия на амплитуды. Временные методы основаны на измерении разности во времени регистрации сигнала на разнесённых в пространстве датчиках.

АЭ используется также для оценки дефектности керамических покрытий материалов при одноосной нагрузке [7].

Несмотря на то, что состояние развития метода акустической эмиссии позволяет говорить о высокой достоверности его результатов, проводятся работы по дальнейшему усовершенствованию точности метода за счёт построения математических моделей, учитывающих физические характеристики дефектов и параметры сигналов одновременно [8]. Такие алгоритмы позволяют существенно повысить точность и достоверность результатов проведённых АЭ-исследований [9].

Многосторонний обзор различных акустических методов контроля бетонов дан в работе [10].

1.3 Электромагнитная эмиссия

Помимо акустической эмиссии было установлено, что при хрупком разрушении диэлектриков возникает слабое электромагнитное излучение. [11-14]

Метод электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) был положен в основу разработки методов неразрушающего контроля [15-17].

Возникновение электромагнитного поля объясняется рядом причин, основными рабочими гипотезами считаются эмиссия электронов на краях растущего дефекта [11-13], эмиссия, вызванная неравномерным движением зарядовой мозаики по берегам растущей трещины [14, 18], эмиссия при нарушении связей двойных электрических слоев вблизи поверхности разрыва

[19,20]. При этом наиболее существенный вклад в ЭМЭ вносит излучение зарядов, движущихся с вершиной прорастающей трещины [21,22].

Теоретические обоснования возникновения явления электромагнитного излучения были рассмотрены в работах [23 - 25].

Было установлено, что при возникновении трещины время ее развития равно длительности сигнала электромагнитного излучения [23].

Была выдвинута гипотеза о связи между размерами трещин, образующихся под нагрузкой, и длительностями возникающих при этом сигналов [24].

Большой цикл работ посвящен применению метода ЭМЭ для анализа и предсказания геодинамических явлений в горных массивах [26 - 30].

Проводились лабораторные работы по исследованию дефектности и напряженно-деформированного состояния на образцах из диэлектрических материалов с использованием метода ЭМЭ [31 - 33].

Большой цикл работ по исследованию связей между напряженно-деформированным состоянием (НДС) и амплитудно-временными параметрами сигналов ЭМЭ был выполнен в Институте горного дела СО РАН [34].

В Томском политехническом университете проведены исследования оценки степени дефектности диэлектрических материалов по характеру амплитудных распределений импульсов ЭМЭ в условиях НДС.

1.4 Метод механоэлектрических преобразований

В 70-ых годах в Томском политехническом университете начинает разрабатываться метод механоэлектрических преобразований (МЭП) для контроля структурных нарушений в композитных диэлектрических материалах [35-43]. Сигнал в образец посылается при помощи импульсного механического воздействия. Возбуждается акустическая волна, которая отражается от границ образца и дефектов и взаимодействует с источниками

механоэлектрических преобразований в образце. При взаимодействии часть энергии возбуждающего импульса уходит на создание электромагнитного сигнала, который несёт информацию о характеристиках возбуждающей волны. Сигнал отклика регистрируется при помощи емкостных датчиков, снимая тем самым требования к акустическому контакту между приёмником и образцом [20].

Были проведены экспериментальные исследования по оценке возможности использования явления МЭП для дефектоскопии, контролю напряженно-деформированного состояния и прочности композитных материалов.

Так в работе [20] проведен анализ чувствительности метода МЭП к размеру зерна в бетонах. Ряд работ посвящен рассмотрению механизмов МЭП. Установлена зависимость амплитудно-частотных характеристик электромагнитного отклика на ударное возбуждение бетонов от размеров и геометрии расположения в них включений. Предложена физическая модель источника сигнала и получены расчетные значения частотной характеристики отклика по электрической цепи замещения. Показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает правильность предложенного механизма механоэлектрических преобразований.

В работе [44] показано, что электромагнитный отклик при ударном возбуждении высокоомных композиционных материалов может иметь паразитные составляющие, связанные с перемещением металлического бойка ударного устройства и с электризацией материала в точке удара.

В работе [45] проводились исследования изменений спектральных характеристик отклика при одноосном сжатии контактирующих образцов горных пород разного состава. Показано существенное влияние на отклики контактов горных пород, различных по минералогическому составу.

Предложен и физически обоснован метод определения динамики изменения качества контакта и адгезионной прочности диэлектрической

матрицы и металла в армированных композиционных материалах на основе явления МЭП [26].

В работе [27] установлена связь частотных характеристик электромагнитных сигналов с характеристиками воздействующего акустического сигнала на образцы из искусственного кристаллического кварца и реальных горных пород, представленных кварцитами, а также исследовано изменение спектральных характеристик отклика от расстояния между емкостным датчиком и поверхностью образца.

В работе [46] показано, что с использованием метода механоэлектрических преобразований можно оценивать степень напряженно-деформированного состояния, создаваемого температурными полями.

Показана эффективность метода МЭП [23, 47, 48] при оценке дефектности бетона при циклическом замораживании-оттаивании.

Проведены исследования влияния влажности на параметры электромагнитного отклика при импульсном механическом возбуждении образцов из бетона [24]. Разработана схема замещения электрических процессов, влияющих на параметры отклика при различной степени влажности.

В работе [25] была дана оценка влияния структурных фазовых переходов при термической обработке гипса на параметры электромагнитного отклика на его ударное возбуждение.

Были проведены исследования влияние слоистости композитных материалов на параметры электромагнитного отклика при использовании метода МЭП. Так, в работе [49] показано, что увеличение числа слоев существенно влияет на спектр отклика.

Ряд работ посвящен математическим моделям метода МЭП [50-52]. При этом реализовано два подхода. В основе одного из них используется лучевое приближение для расчетов движения фронтов акустических волн в образце.

В основе другого лежит численный метод расчета волновых полей в соответствии с уравнениями, входящими в математическую постановку

плоской задачи теории упругости. Она включает в себя уравнения движения, геометрические соотношения (соотношения Коши), физические соотношения, начальные и граничные условия [52].

Лучевая математическая модель [50] дает возможность задавать размеры образца в виде параллелепипеда, координаты источника механического возбуждения и приемника сигнала, привязанные к образцу.

Применение указанной модели может быть полезным для выбора оптимальных параметров разрабатываемого метода контроля.

Расчеты по указанной модели показали, что геометрия системы источник акустического сигнала – образец – емкостный приемник электромагнитного отклика оказывает существенное влияние на его форму и спектральные характеристики.

Кроме того, расчеты показали, что при однородном распределении источников МЭП по образцу основной вклад в сигнал отклика оказывают источники, находящиеся в непосредственной близости от приемника сигнала.

Была разработана мультисенсорная система неразрушающего контроля материалов по параметрам электрических откликов при механоэлектрических преобразованиях [53].

Образец возбуждался заданным числом коротких акустических импульсов (ударов) определенной формы и амплитуды. Повторное число возбуждений образца позволило существенно увеличить отношение сигнал/шум, и, следовательно, повысить чувствительность системы по обнаружению малых изменений исследуемых параметров образца.

1.4.1 Локализация дефектов в виде сколов и отверстий мультисенсорной системой контроля

Попытки использования МЭП для локации дефектов в объеме материала предпринимались и до постановки данной работы с использованием мультисенсорной системы контроля [53]. Были проведены эксперименты по

регистрации электрических откликов из образца, изготовленного из эпоксидной смолы с наполнителем из песка с большим содержанием кварца [54]. Форма образца – прямоугольная с размерами 100x80x50 мм³. Использовалась система приемников в количестве 20 шт., каждый в виде квадрата со стороной в 1 см. Форма импульса выбиралась таким образом, чтобы его спектр был в диапазоне (5 – 100) кГц. Частота оцифровки составила 800 кГц. Количество повторных ударов – 60. Было показано, что отклик с каждого указанного датчика имеет свою характерную форму.

Производился сравнительный анализ средних значений откликов (в дальнейшем откликов) из образца с каждого приемника при наличии отверстий разной глубины относительно откликов из того же образца без отверстия.

Эксперименты показали, что сигналы откликов для разных приемников сигнала отличаются как по уровню, так и по форме.

Было показано, что соотношение сигналов разности для одного и того же датчика по уровню и форме различаются, что свидетельствует о разном влиянии глубины отверстия на перераспределение акустических волн. Наибольшее соотношение разностей от глубины отверстия наблюдается для датчиков, находящихся вблизи отверстия.

Для оценки достоверности полученных результатов был использован метод статистической проверки гипотез, основанный на распределении Стьюдента [55].

Было показано, даже при самом слабом отличии сигнала отклика при глубине отверстия в 2 мм от исходного сигнала отклика имеются временные области, где разница в откликах не являются случайными. Для других разностей такие временные области существенно расширяются.

Показано, что наличие объемного дефекта в виде отверстия также изменяет спектры откликов, поэтому спектральные характеристики могут быть использованы при исследовании малых объемных дефектов образца [56].

В работе [57] дана оценка влияние шероховатости поверхности образца на отклик с использованием метода МЭП. Источник МЭП воспринимает суперпозицию волн, что и определяет характер электромагнитного отклика. Исследования показали, что образец на низких частотах обладает довольно высокой добротностью. Если длительность импульса при механическом ударе составляет десятки микросекунд, то отклик длится единицы миллисекунд. Это значит, что волны много раз (до 60) отражаются от стенок образца, прежде чем затухнуть. При таких условиях состояние поверхности образца может существенно влиять на рассеяние отраженных лучей, что влияет на суперпозицию волн в зоне источников МЭП, а, следовательно, на форму зарегистрированного сигнала отклика.

Проверка данного предположения была проведена на образцах из цементно-песчаной смеси (30% цемента, 60% песка) размерами 100x50x50 мм³.

Вблизи поверхности образца располагались шесть датчиков. На смежную грань наносились два конусообразных углубления глубиной 2 мм и диаметром 4 мм в районе 3 и 4 датчиков. Пьезопреобразователь крепился к образцу со стороны той же грани. Осуществлялась серия ударов по образцу без углублений и такая же серия ударов по образцу с нанесенными углублениями. После каждого удара регистрировался электрический отклик, преобразовывался в цифровой вид с частотой оцифровки 250 кГц, и поступал в базу данных ЭВМ. Затем находились средние значения откликов после повторных ударов с привязкой к моменту удара.

Было показано, что АЧХ откликов из образца без лунок и с лунками отличаются незначительно. Поэтому АЧХ откликов мало пригодны для пространственно-временного анализа в данном эксперименте. Для повышения информативности были рассчитаны АЧХ разностей спектров, в которых учитывались как амплитуда, так и фаза отклика. Показано, что фазы спектральных характеристик являются надежным инструментом при исследовании поверхностных дефектов на образце.

В работе [53] продемонстрированы возможности использования разработанного программно-аппаратного комплекса на основе метода механоэлектрических преобразований для определения местоположения дефекта в протяженном изделии.

Исследования были проведены на двух моделях из тяжелого бетона: без дефектов и с искусственными дефектами в виде воздушных полостей размером $200 \times 200 \times 100 \text{ мм}^3$, расположенных на глубине 30 мм от поверхности и на расстоянии 70 мм от края образца. Было проведено пространственное сканирование моделей с помощью выносного измерительного зонда.

Показано, что в месте нахождения дефекта коэффициент корреляции резко уменьшается, в то время как при сканировании бездефектного образца он находится в одном диапазоне. Приведенные результаты показывают, что использование разработанного комплекса с выносным измерительным зондом позволяет осуществлять сканирование протяженных объектов и определять местоположение дефекта в изделии из бетона.

Таким образом, можно заключить, что метод МЭП базируется на существующих акустических методах контроля, однако имеет ряд существенных преимуществ, позволяющих эффективно использовать его для неразрушающего контроля твёрдых диэлектрических структур.

1.4.2 Явление реверберации при реализации метода механоэлектрических преобразований

Явление реверберации наблюдается, когда приёмник получает совокупность сигналов, многократно отражённых от границ объекта контроля. Это явление используется при осуществлении других видов акустического контроля [58-61]. При этом реверберация может быть рассмотрена и как помеховый фактор в случае, когда стоит задача выделения сигнала, отражённого от объекта контроля из совокупности сигналов, отражённых от границ среды [62-63].

При проведении исследований методом МЭП длительность отклика при низкочастотном импульсном возбуждении может быть достаточно велика, что свидетельствует о многократном прохождении акустической волны возбуждения через зоны неоднородности. Так, для образцов из бетона при длительности возбуждения в десятки микросекунд длительность отклика в полосе частот (10 – 50) кГц достигает десятка миллисекунд, что обеспечивает более 60 отражений при линейных размерах образца 100мм.

Преимущество многократного отражения акустической волны по сравнению с однократным в ультразвуковых методах контроля состоит в том, что фронт волны многократно пересекает дефектные зоны объекта контроля (ОК) и области неоднородностей структуры, связанных с напряжённо-деформированным состоянием (НДС). Поэтому, несмотря на относительно малый эффект влияния микротрещин или локальных неоднородностей на фронты волны возбуждения, искажения фронтов накапливаются. Это приводит к заметному изменению формы отклика и обеспечению поиска таких его параметров, которые однозначно связаны со степенью дефектности и НДС ОК [61].

Временная реализация отклика рассматривается как сумма двух составляющих: детерминированной и псевдослучайной, для анализа которой можно применить статистические методы оценки [55].

В работе [64] измерялись разностные сигналы откликов при различных уровнях нагрузки бетонных образцов. Оценка значимости различий была проведена с использованием t-критерия Стьюдента. Рассчитывались уровни значимости, а также критические значения при уровне значимости $\alpha=0.001$ и числе степеней свободы 158.

На рис. 1.1 показан временной ход уровней значимости, а также критический уровень (изображен в виде жирной линии параллельной оси абсцисс).

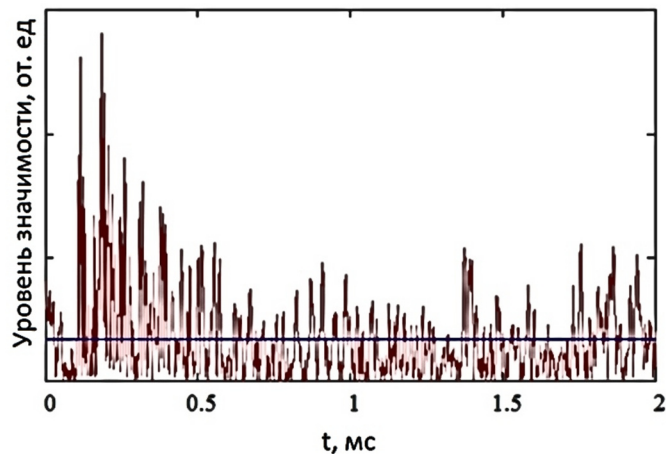


Рисунок 1.1 – Проверка значимости различий по критерию Стьюдента

На всем интервале реализации разность откликов является значимой с вероятностью 99.9%.

Для подтверждения предположения о влиянии скорости звуковой волны возбуждения на отклики при импульсном акустическом возбуждении был произведен расчет с использованием математической модели, основанной на лучевом приближении распространения акустической волны возбуждения [50].

Для облегчения расчета модель образца представлена в виде повторяющихся структур с геометрией образца в виде параллелепипеда с зеркальной симметрией, расположенных в нем, фиктивных источников механоэлектрических преобразователей и фиктивных приемников сигнала.

Это позволяет представить фронт акустической волны возбуждения в виде поверхности полусферы с центром в точке возбуждения.

На рис. 1.2 показано двумерное отображения схемы замещения. Точками на ней отображены фиктивные источники МЭП; треугольником обозначена точка возбуждения образца. Полуокружности отображают двумерные проекции фронтов волны.

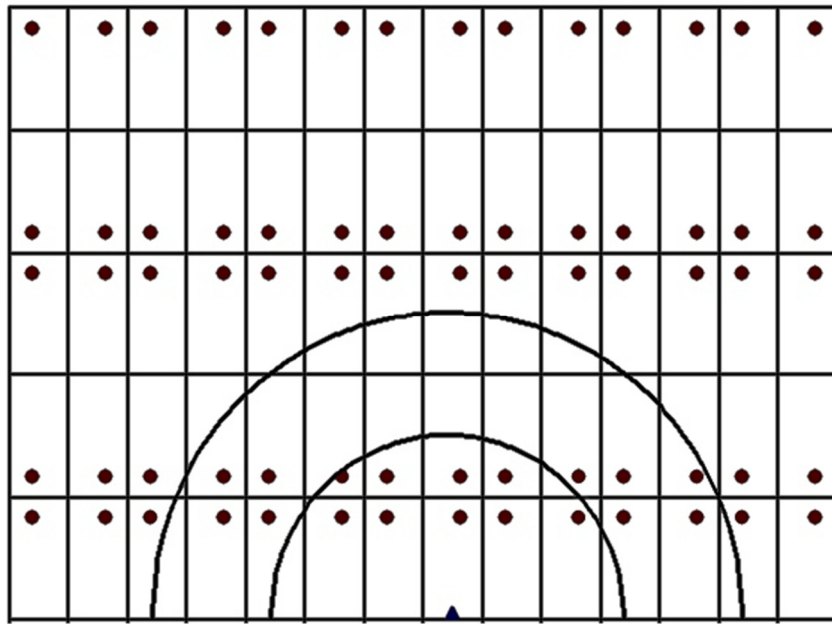


Рисунок 1.2 – Плоская схема замещения образца в виде периодической структуры

Для более адекватного отображения отклика в условиях реверберации, а, следовательно, прохождения акустической волны возбуждения достаточно большого пути необходимо учитывать ее частотно-зависимое затухание. Известно, что в твердом теле затухание гармонической акустической волны происходит за счет внутреннего трения по экспоненциальному закону обратно пропорциональной квадрату частоты. Поэтому в указанную математическую модель расчета были добавлены уточнения, которые обеспечивали учет частотно-зависимого затухания импульса возбуждения [65].

Были проведены расчеты откликов при скорости звука $v = 3000$ м/сек и при ее изменении на 0.1 %. На рис. 1.3 показаны расчетный отклик при скорости v , а также разностный сигнал откликов при разных скоростях звука.

Как видно из рисунка, разностный сигнал расчетного отклика имеет характерные колебательные составляющие (рис. 1.3), похожие на те, которые были получены из эксперимента. Кроме того, в расчетном разностном отклике, как и в отклике реального эксперимента, наблюдается задержка во времени.

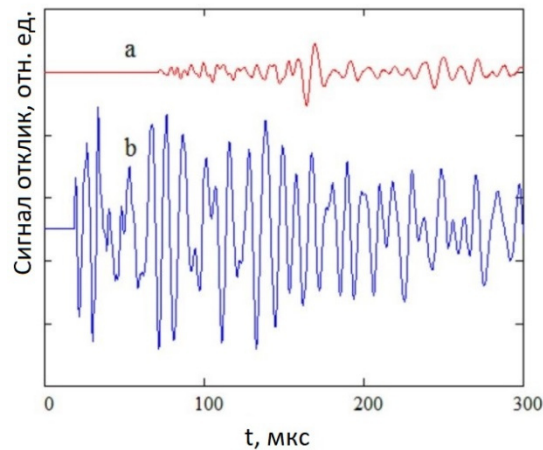


Рисунок 1.3 – Расчетные отклики: а) отклик при скорости звука 3000 м/сек;
б) разность откликов при изменении скорости звука на 0.1%

Средняя скорость акустической волны в образце при изменении концентрации дефектов меняется вследствие удлинения ее пути за счет огибания дефектов. Скорость распространения акустических волн также изменяется в условиях НДС за счет изменения локальной плотности испытываемого материала.

Естественной особенностью реверберации является наложение отраженных от границ волн возбуждения. При этом складываются те отклики, которые лежат в интервале времени, равной длительности импульса возбуждения.

Для оценки характеристик откликов, в заданные интервалы времени был выполнен расчет по математической модели следующим образом. Были рассчитаны импульсные характеристики откликов в сферических слоях, шириной 50 мкс, что соответствует обычной длительности импульса возбуждения.

Было рассчитано число фиктивных источников в каждом сферическом слое. На рис. 1.4 показана зависимость количества фиктивных источников в сферическом слое от его номера (номера слоев соответствуют возрастанию радиуса фронта волны).

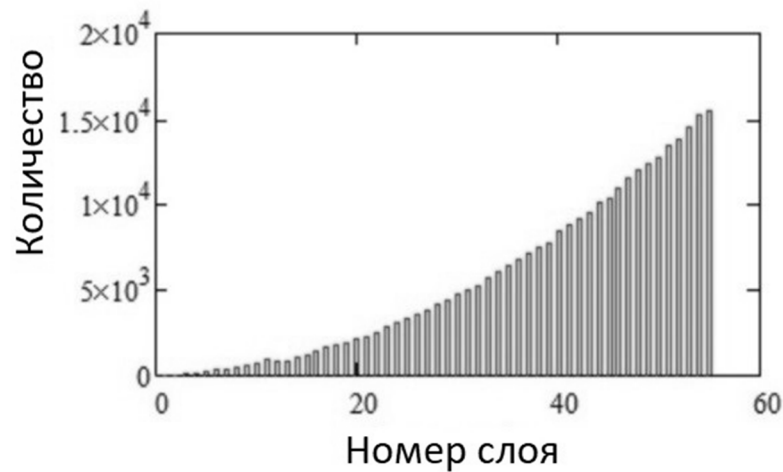


Рисунок 1.4 – Зависимость числа фиктивных источников от номера слоя

Как видно из рисунка, число источников возрастает по квадратичному закону, что является естественным, так как по такому же закону увеличивается объем сферического слоя заданной толщины. Расчет средней интенсивности импульсной характеристики в каждом слое, показывает линейный рост (рис. 1.5), что объясняется убыванием сигнала возбуждения обратно пропорционально расстоянию до источника.

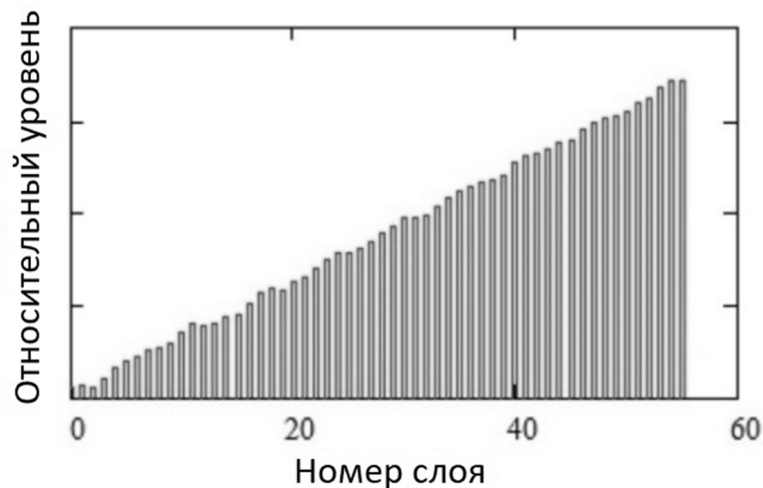


Рисунок 1.5 – Зависимость средней интенсивности импульсной характеристики от номера слоя

Таким образом, явление реверберации может быть учтено и повышает информативность метода МЭП для определения степени НДС.

1.4.3 Дифракционные явления при взаимодействии акустической волны возбуждения с поверхностью макродефекта

Для поиска дефектов в образце при помощи акустических методов необходимо понимать процессы взаимодействия акустической волны с поверхностью дефекта. Электромагнитный сигнал, который регистрируется в ходе изучения, по сути характеризуется скоростью смещения электрических зарядов двойных слоёв источников МЭП, которое вызвано прохождением акустической волны. Таким образом, свойства упругих волн, вызывающих электромагнитный импульс, должны иметь своё отражение в характере электромагнитных сигналов, регистрируемых аппаратурой. Поэтому необходимо обладать информацией о волнах, вызвавших возбуждение.

Волна может быть поглощена, отражена или рассеяна на дефекте. При анализе дефектности твёрдых диэлектрических структур точечные дефекты рассматриваются в виде сфер. Обычно это вкрапления наполнителя, пузырьки или другие несплошности структуры. В зависимости от волнового размера рассеивателей, в акустике принято выделять три области рассеяния:

- 1) Рэлеевское рассеяние – наблюдается для малых сфер ($k_a \ll 1$);
- 2) Резонансное рассеяние - характерный размер рассеивателя соизмерим с длиной звуковой волны ($k_a \approx 1$);
- 3) Рассеяние по законам геометрической акустики – применимо для больших сфер ($k_a \gg 1$).

Рассеяние на малых сферах может быть описано при помощи уравнения Рэля, полученного им в 1896 году в следующем виде:

$$Sr^2 = \frac{(ka)^4 a^2}{\pi} \left(\frac{e-1}{3e} - \frac{g-1}{2g+1} \cos \theta \right)^2 \quad (1.1)$$

где S - отношение интенсивности рассеянной волны к интенсивности падающей, r - расстояние до рассеивателя, a - радиус сферы, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число для среды, $e = E_1/E_0$ = отношение модулей упругостей сферы и среды, $g = \rho_1/\rho_0$ = отношение плотностей сферы и среды.

Эффективное поперечное сечение рассеяния определяется так:

$$Q_s = 4\pi a^2 (ka)^4 \left(\frac{e-1}{3e}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{g-1}{2g+1}\right)^2 \quad (1.2)$$

На рисунке 1.6 представлены индикатрисы рассеяния сфер с разными значениями относительной плотности, относительной скорости звука и относительной упругости [59].

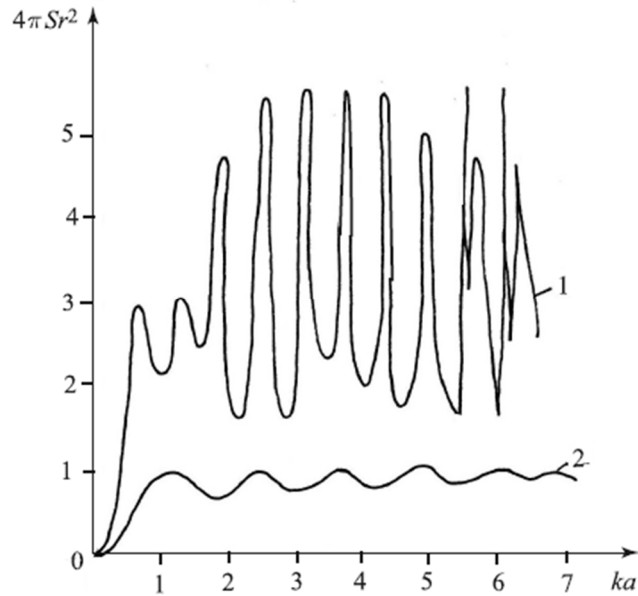


Рисунок 1.6 – Индикатрисы рассеяния сфер с разными значениями относительной плотности, относительной скорости звука и относительной упругости

Кривая 1 соответствует сфере, у которой волновое сопротивление в четыре раза меньше волнового сопротивления среды (то есть относительно мягкая сфера), а кривая 2 соответствует жесткой сфере. Область релеевского рассеяния находится в диапазоне волновых чисел от 0 до 1, значит сечение рассеяния пропорционально $(ka)^4$. Это означает, что акустическое сечение рэлеевского рассеяния гораздо меньше геометрического поперечного сечения тела, поскольку звуковые волны огибают малые тела, практически не взаимодействуя с ними. Следовательно, если широкополосный звуковой сигнал попадает на малые нерезонансные рассеиватели, обратное рассеяние будет гораздо более сильным для высокочастотных компонент сигнала.

Во второй - резонансной ($ka = 1$) области рассеяния, жесткая сфера ведет себя более сложным образом, и характеристики рассеянного поля сильно зависят от частоты. Для любой жидкой сферы, когда длина звуковой волны внутри сферы сравнима с ее радиусом или меньше его, становятся существенными условия распространения волн внутри сферы, параметры возникающих внутри тела стоячих волн зависят от собственных резонансных частот тела. Когда внутри тела возбуждаются волны, функции и сечения рассеяния имеют пики и впадины на частотах, совпадающих с собственными частотами сферы (кривая 1 на рис. 1.6).

Третья область рассеяния ($ka \gg 1$) описывается геометрической акустикой, для анализа процесса используется высокочастотное лучевое приближение. Индикатриса рассеяния в случае жесткой сферы при таком рассеянии определяется следующим выражением [2]:

$$Sr^2 = \frac{a^4}{4} \left(1 + ctg^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) J_1^2(ka \sin \theta) \right) \quad (1.3)$$

где $J(\sin \theta)$ – цилиндрическая функция Бесселя первого рода.

Это означает, что функция обратного рассеяния для жесткой сферы при $ka \gg 1$ (в области $\theta \neq \pi$) является приблизительно постоянной величиной (рис. 1.6). Следовательно, интенсивность обратного рассеяния прямо пропорциональна площади поперечного сечения рассеивателя. Сочетание рэлеевского рассеяния с рассеянием в приближении геометрической акустики приводит к тому, что жесткая сфера для обратного рассеяния играет роль фильтра высоких частот с граничной частотой, соответствующей приблизительно равенству $ka \approx 1$.

По мере роста волнового размера ka на круговой индикатрисе рассеяния развивается лепесток, соответствующий рассеянию вперед, который создается тенеобразующей волной (второе слагаемое выражения (1.2)). Практически сигнал, рассеянный при углах, близких к 180° , трудно отделить от падающей волны, которая распространяется по тому же пути и примерно в то же время.

Следует отметить также, что упругие рассеиватели в геометрической области рассеяния ведут себя гораздо сложнее, и их акустическая тень при больших ka определяется с учетом большого числа мод.

Одно из возможных описаний основывается на объяснении Зоммерфельдом искривления радиоволн при их распространении вблизи земной поверхности. Этот метод был использован Францем для объяснения дифракции электромагнитных волн на непроводящих цилиндрах и сферах. Этот метод используется и в акустике: при описании распространения звука вблизи поверхности тела надо учитывать новый тип неоднородных волн (ползущих), скорость которых меньше скорости волн в неограниченном объеме жидкости и зависит от упругих свойств рассеивателя, затухание этих волн велико и увеличивается с увеличением угла рассеяния [66].

Следует отметить, что в задачах рассеяния граница раздела двух сред играет огромную роль, и поэтому в акустике принята следующая классификация (для определения граничных условий): акустически мягкая, акустически жесткая и импедансная границы.

Акустически мягкая граница удовлетворяет условию Дирихле, что соответствует возникновению на границе пучности стоячей волны колебательной скорости и узел акустического давления, а скачок фазы на границе испытывает волна давления.

Акустически жесткая граница удовлетворяет условию Неймана. При этом на границе возникает узел стоячей волны колебательной скорости и пучность акустического давления, а скачок фазы на границе испытывает волна колебательной скорости.

Исследованию бетонных конструкций со сложной структурой и высоким коэффициентом частотно-зависимого затухания посвящена работа [67].

Объёмные диаграммы рассеяния акустических сигналов на различных дефектах структуры так же приведены в работе [68].

1.4.4 Методы обработки сигналов

Принятый сигнал отклика представляет собой совокупность полезной составляющей сигнала и различных шумов: стационарных или детерминированных и случайных.

В этом смысле перед нами стоит так же задача синтеза – то есть определения оптимальной схемы приёма сигнала, способной обеспечить наибольшую помехоустойчивость в заданных условиях проведения эксперимента [69]. Эта задача делится на 4 составляющих: обнаружение сигнала, различение сигналов, оценка параметров сигнала и фильтрация.

Задача обнаружения сводится к определению наличия полезной составляющей сигнала. При использовании метода МЭП наличие полезной составляющей сигнала показано как лабораторией ПНИЛ ЭДИП [53], [70], так и другими научными группами [71].

Задачи различения сигналов и оценки параметров предполагают наличие критерия оптимальности, в соответствии с которым можно различить между собой несколько сигналов и определить их параметры наилучшим образом.

Задача оптимальной фильтрации предполагает такую обработку сигнала, при которой в заданный момент достигается максимальное соотношение сигнал/шум.

Для задач, поставленных в данной диссертации, перспективными являются корреляционный и фазовый методы обработки информации. Оба метода являются временными, что позволяет определить координаты дефекта, имея информацию о геометрии образца и скорости акустической волны.

Суть корреляционного метода состоит в поиске участка временной реализации сигнала, который будет максимально коррелировать с исходным сигналом. Время, соответствующее участку сигнала с максимальной корреляцией, будет являться временем, через которое отражённый от дефекта

сигнал снова достигнет границы образца в непосредственной близости от детектора.

Методика распознавания образов ультразвуковых сигналов при помощи оконных функций приведена в работах [72, 73].

Суть фазового метода состоит в анализе фазовременной характеристики аналитического представления сигнала отклика. При наложении отражённого от искомого дефекта сигнала на исходный возникают скачки фазовременных характеристик, что дает возможность оценить глубину залегания дефекта.

Обзор состояния развития методов неразрушающего ультразвукового контроля приведён в работе [74], статья сфокусирована на методах, используемых для томографии образцов из бетона. В том числе в статье сделан вывод о перспективности применения методов, основанных на оценке фазовых характеристик сигналов. Вариант оценки степени различия структуры по фазовым характеристикам с помощью анализа мгновенного спектра сигнала приведён в работе [75].

Задача поиска распределения отражателей по дальности с помощью обращения свертки эхосигналов описана в работе [76].

Работа [77] посвящена использованию метода двойного сканирования для повышения качества изображения дефектов. В этом случае излучатель и приёмник движутся по параллельным линиям независимо.

Помехоустойчивость можно улучшить, исследуя мгновенную частоту [78]. Метод позволяет уверенно различать эхосигналы, отражённые от различных типов дефектов.

Для повышения разрешающей способности может быть использован метод максимальной энтропии. В работе [79] показано, как с использованием этого метода восстанавливать изображения отражателей. Аналогичный процесс для приёмников в виде тактированных фазированных решёток приведён в работе [80].

В работе [81] приведён алгоритм улучшения разрешающей способности ультразвуковых сигналов с использованием алгоритмов разреженной

деконволюции и декомпозиции на эмпирические моды. Полученные результаты показывают принципиальную возможность повышения разрешающей способности.

Выводы по главе 1

Поскольку генеральная цель работы заключается в разработке неразрушающего метода контроля неметаллических материалов, то из рассмотрения исключаются методы контроля, применяемые исключительно для работы с электропроводящими материалами и ферромагнетиками. А это все модификации магнитного и вихретокового методов контроля. Так же, в связи с высокой проникаемостью рентгеновского излучения и его опасным влиянием на здоровье человека, исключаются из рассмотрения и рентгеновские методы контроля качества объектов.

Из наиболее распространенных методов контроля неметаллических материалов могут быть перспективными ультразвуковые методы, методы акустической и электромагнитной эмиссии, а также метод механоэлектрических преобразований.

Методы ультразвукового контроля хорошо изучены и широко применяются, однако имеют свой ряд недостатков: они очень чувствительны к качеству поверхности и поверхностного контакта приёмника и исследуемого объекта, это накладывает свои требования к процессу подготовки образцов. Так же методы ультразвуковой дефектоскопии затруднительно применять для контроля изделий сложной формы и малых размеров.

Методы акустической и электромагнитной эмиссии являются по своей сути пассивными методами контроля. Метод акустической эмиссии так же чувствителен к поверхностному контакту. При использовании метода электромагнитной эмиссии основным недостатком является большая зашумлённость сигнала внешними радиосигналами. Требуется экранирование или создание условий, повышающих амплитуду принимаемого сигнала,

например, путём поляризации на границах дефектов. Повышение же амплитуды сигнала при методе акустической эмиссии в принципе не представляется возможным.

Метод механоэлектрических преобразований позволяет обойти некоторые ограничения других методов неразрушающего контроля. Акустическое возбуждение образца создаёт механическую волну упругих деформаций, которая рассеивает часть своей энергии на источниках механоэлектрических преобразований – небольших локальных дефектах, пьезоэлектрических включениях, дислокациях и прочее. Энергия рассеивается в виде слабого электромагнитного излучения, параметры которого регистрируются бесконтактно, что снимает ограничения с поверхности образца. При увеличении амплитуды посылаемого акустического сигнала повышается и амплитуда принимаемого электромагнитного. При этом при неизменной геометрии измерительной системы и образца регистрируется стабильный сигнал отклика, что позволяет отфильтровать стационарную составляющую шума.

На начальном этапе развития метода возбуждение проводилось ударом металлического шарика с заданной скоростью, переход к возбуждению пьезоэлектрическим преобразователем существенно повысил стабильность и воспроизводимость результатов. Были исследованы закономерности генерации электромагнитных сигналов при импульсном механическом возбуждении, что позволило разработать аппаратуру для более детального изучения характеристик сигнала. Использование более оптимизированного оборудования позволило применять метод механоэлектрических преобразований для контроля напряжённно-деформированного состояния неметаллических изделий, оценки интегральной дефектности образцов, а также выявления мест скопления дефектов. Тем не менее, рост интенсивности принимаемого сигнала и развитие способов фильтрации позволяет предположить, что метод механоэлектрических преобразований может быть использован также для поиска и характеристики отдельных дефектов.

Эта работа является продолжением исследований проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета и нацелена на выявление закономерностей в электромагнитных сигналах, которые позволят определять глубину залегания отдельных дефектов. Для этого необходимо оптимизировать параметры посылаемых акустических сигналов, а также применить временные методы оценки электромагнитных сигналов откликов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСЛЕДОВАНИЙ

Задача поиска дефектов требует разработки аппаратного комплекса и надёжной методики. Процесс сводится к изучению электромагнитных сигналов, полученных в ходе механических возбуждений образца, соответственно включает в себя установление однозначных связей параметров сигналов со свойствами образца, его геометрией, наличием и положением дефектов.

С этих позиций важное значение приобретают вопросы выбора типа излучателя для ультразвуковых волн, решение проблем структурного шума и выработки методики обработки информационных сигналов.

Для решения задачи локализации макродефектов была использована лабораторная установка для анализа дефектов методом механоэлектрических преобразований. Она состоит из усилителя, компьютера, манипулятора и системы излучатель-приёмник. 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.

2.1 О выборе типа излучателя для ультразвуковых волн

Есть множество типов ультразвуковых излучателей. Сегодня преимущественно применяются пьезоэлектрические преобразователи. Однако раньше возбуждение часто происходило с использованием механических бойков или ударов металлическим шариком. Большинство работ, проведённых научными группами до настоящего момента, основаны на ударном механическом возбуждении образца.

Выбор излучателя проводится исходя из следующих соображений. Разрешающая способность метода зависит от длины волны и соответственно от частоты излучения. Если размер дефекта оказывается меньше четверти длины волны имеет место преимущественно дифракция, соответственно, чем выше частота, тем больше разрешающая способность аппаратуры. С другой стороны, амплитуда полученного отражённого сигнала обратно пропорциональна частоте, что вызвано затуханием ультразвуковых волн в среде.

В целом затухание обусловлено рядом причин. При точечном возбуждении фронт распространяющейся волны можно считать сферическим, а значит интенсивность излучения убывает с расстоянием, так как энергия распространяется на поверхность расходящейся сферы [2]. Затухание можно компенсировать, учитывая поправочный коэффициент

$$A(r) = A_0 e^{-\delta r} \quad (2.1)$$

Где $A(r)$ – амплитуда в заданной точке пространства, A_0 – начальная амплитуда, δ – коэффициент затухания, r – расстояние.

Коэффициент затухания δ – это величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда волны меньше исходной в e раз. Коэффициент затухания можно представить в виде суммы коэффициента поглощения и коэффициента рассеяния.

$$\delta = \delta_{\pi} + \delta_p \quad (2.2)$$

При рассеянии волна меняет своё направление, то есть энергия остаётся звуковой, но не доходит до приёмника или доходит в другой временной промежуток, что не позволяет учитывать её при приёме сигнала. Поглощение же обусловлено рядом причин, таких как вязкость (внутреннее трение), упругий гистерезис и теплопроводность. Энергия волны переходит в тепловую энергию. Для всех случаев коэффициент поглощения напрямую зависит от частоты излучения: внутреннее трение $\delta_{\pi} \sim f$; теплопроводность $\delta_{\pi} \sim f^2$; упругие эффекты $\delta_{\pi} \sim f$.

Таким образом повышение частоты с одной стороны необходимо для хорошей разрешающей способности, с другой стороны приводит к сильному затуханию волн. Проблема может решаться изначально высокой энергией излучения. Этого можно добиться при механическом воздействии шариком, что объясняет широкое использование именно такого способа возбуждения в ранних работах по изучению МЭП, однако этот метод имел ряд очевидных проблем. Во-первых, часть энергии возбуждения может перейти в неупругую деформацию среды, что не только не даёт дополнительной информации при контроле, но и разрушает образец. Во-вторых, при таком возбуждении каждый удар отличается от предыдущего, невозможно в точности повторить все параметры. Кроме того, при таком воздействии не представляется возможным обеспечить высокочастотную составляющую спектра возбуждения, потому что при большой энергии шарика время удара также большое.

Пьезоэлектрические преобразователи выдают значительно меньше акустической энергии, однако позволяют генерировать сигналы заданной формы и частоты, а также обеспечивают высокую стабильность параметров возбуждения. Проблему с невысокой энергией возбуждения частично позволяет компенсировать тот факт, что энергия способна накапливаться из-за явления реверберации [61].

В данной работе проводились исследования с пьезоэлектрическим преобразователем. Рабочие частоты исследований составляли от 100 до 300 кГц. При габаритах исследуемых объектов контроля волны в данном частотном диапазоне позволяли выделить полезную составляющую сигнала на фоне структурного шума и шумов аппаратуры.

Другим методом возбуждения является термооптическое возбуждение [82]. Поверхность облучается лазером, из-за чего происходит неоднородный нестационарный нагрев приповерхностного слоя. Такой нагрев вызывает локальные механические напряжения в среде. Частотный спектр и амплитуда такого сигнала определяется интенсивностью поглощения лазерного импульса во времени и теплофизическими свойствами среды.

Главным преимуществом такого метода возбуждения является возможность получения коротких широкополосных сигналов с большой амплитудой. Частоты возбуждаемых сигналов могут достигаться от десятых долей до сотен мегагерц [83].

При распространении волны излучателя в однородной среде принято разделять звуковое поле на три области: ближнюю, переходную и дальнюю зоны. Протяжённости зон зависят от частоты преобразователя и скорости звука в среде. Расчётная зависимость звукового давления от расстояния от источника и деление на зоны представлено на рисунке 2.1.

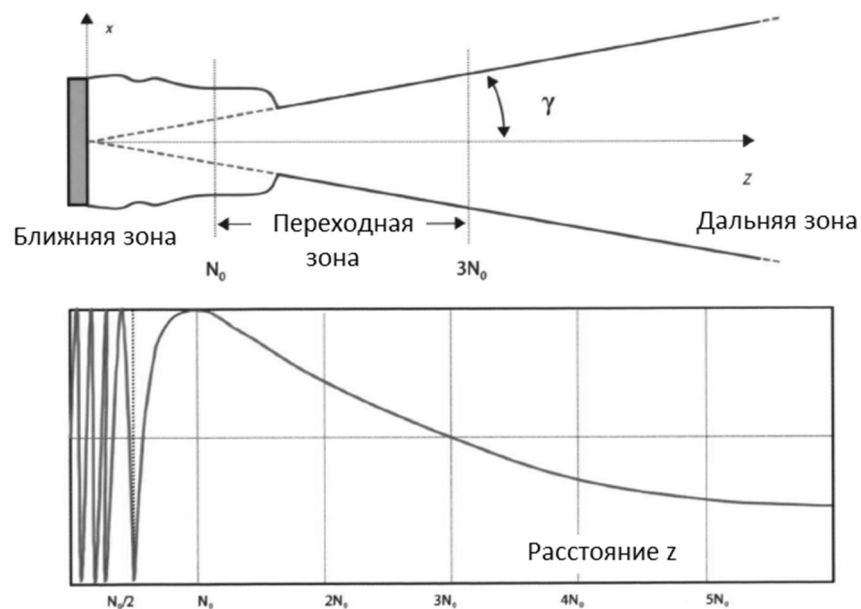


Рисунок 2.1 – Ближняя, переходная и дальняя зоны звукового поля и звуковое давление в этих зонах

Если преобразователь возбуждается коротким импульсом, зависимости звукового давления от расстояния могут быть другими. Характеры кривых звукового давления, соответствующие различным импульсам возбуждения приведены на рисунке 2.2.

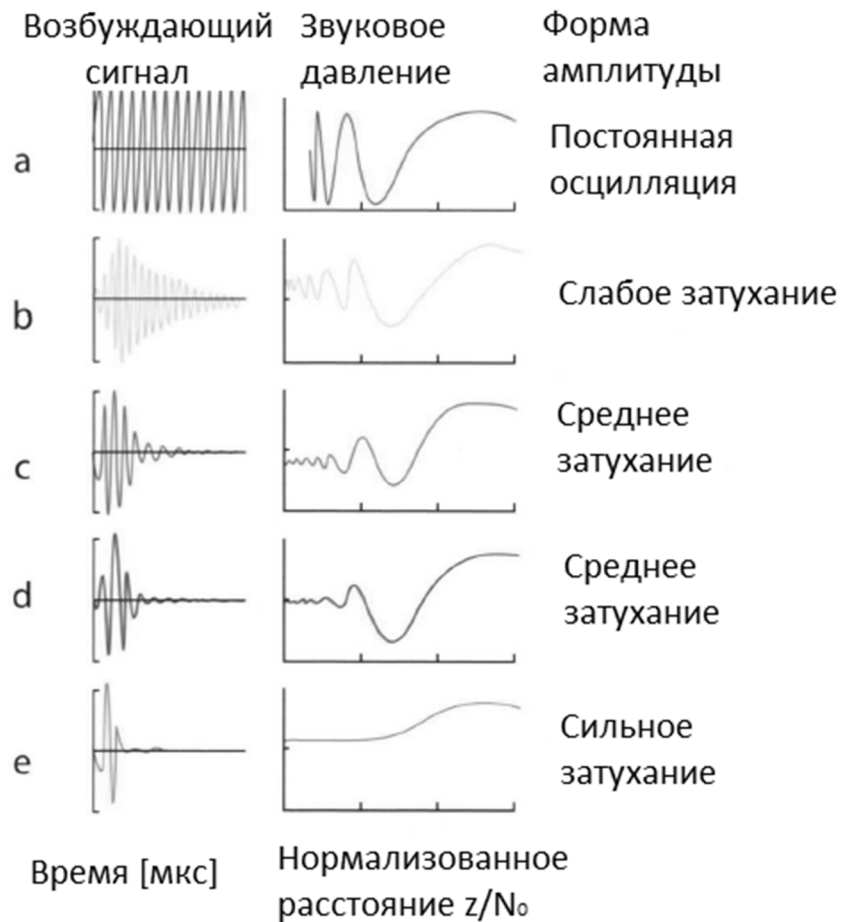


Рисунок 2.2 – Кривые звукового давления при различных формах возбуждающего импульса

В любом случае, в экспериментальных исследованиях искажения будут вносить переходные процессы, происходящие в самом акустическом преобразователе. Сократить длительность переходного процесса можно при помощи компенсирующего электрического импульса, как показано в работе [84].

В работе [85] рассмотрено влияние конструктивных особенностей пьезопреобразователя на длительность сигнала. Определены формы сигналов на выходе излучателя.

2.2 Проблемы, связанные со структурным шумом

В отклике присутствует электрическая составляющая, повторяющая форму акустической волны при воздействии пьезоэлектрического устройства возбуждения на поверхность образца. Поэтому при достаточной длительности импульса возбуждения создаются условия, при которых имеет место ее наложение на сигнал отклика, связанное с отражением акустической волны возбуждения от поверхности макродефекта.

В связи с тем, что в методе МЭП большую роль играют паразитные отклики, обусловленные источниками, распределенными в образце случайным образом, возникает необходимость выделения тех сигналов, которые формируются отраженной от искомого макродефекта акустической волной возбуждения в зону приемника, где преобразуются на источниках МЭП в электрический отклик.

Несмотря на то, что уровень сигнала вблизи приемника существенно превышает уровень сигнала от удаленных источников МЭП [57] зашумленность полезного сигнала может быть довольно сильной. Потому возникает необходимость выделения его из шума.

В работах по оценке степени дефектности методом МЭП это достигалось многократным возбуждением образца импульсом заданной формы при неизменной геометрии конфигурации системы излучатель - образец – приемник.

Статистические оценки показали высокую детерминированность откликов при неизменной геометрии

В ультразвуковой дефектоскопии определение глубины залегания дефекта осуществляется по запаздыванию отраженного от дефекта акустического сигнала относительно момента возбуждения ОК. Для повышения отношения сигнал/шум необходимо стремиться к сужению частотной полосы импульса возбуждения.

В настоящей работе это достигается использованием радиоимпульса с заданным числом периодов заданной частоты.

В таких условиях исходный акустический сигнал может накладываться на отраженный от макродефекта отклик, что требует для определения времени его запаздывания относительно момента возбуждения использовать специальные методы обработки.

Для получения хороших результатов томографии необходимо максимально снизить шумы. В ходе получения сканов методом механоэлектрических преобразований шум может состоять из аппаратных помех, внешних электромагнитных помех и помех, связанных со структурой объекта и процессом прохождения по нему акустических волн.

Детерминированные шумы аппаратуры и внешних помех хорошо фильтруются частотными методами.

Недетерминированные внешние шумы таким образом отфильтровать не получается, но можно улучшить соотношение сигнал/шум. Для повышения отношения сигнал/шум используется принцип накопления полезной составляющей сигнала отклика при многократном возбуждении объекта контроля.

Накопление полезной составляющей сигнала на фоне помех широко используется (например, в локации, астрономии).

Суть его состоит в том, что если объект исследования, обладающий детерминированной импульсной характеристикой, возбуждать серией из N импульсов заданной формы, то на выходе будет получена последовательность откликов, представляющих смесь полезных составляющих и шумов. При когерентном сложении полезных составляющих их уровень возрастет в N раз. Стохастические составляющие шума будут складываться некоррелированно, и их уровень возрастет в $\sqrt{N}$ раз. В результате сложения откликов отношение сигнал/шум по уровню сигналов возрастет в $\sqrt{N}$ раз [53].

При сканировании образцов сложной структуры, а именно к таким относятся композитные материалы, бетоны и прочие диэлектрические

материалы, рассматриваемые в данной диссертации, возникает проблема фильтрации структурного шума.

Структурный шум возникает при многократном отражении возбуждающей волны от неоднородностей объекта контроля. Отражённые сигналы сильно коррелируют с исходным, поэтому их невозможно отфильтровать частотными методами – они содержат весь набор частот исходного сигнала и «полезного» сигнала – отражённого от дефекта. Для работы с такими шумами требуется применять пространственно-временные методы обработки.

Особенностями структурного шума является то, что обусловленный им отклик стабилен при неоднократном возбуждении образца одной и той же системой возбуждения в случае неизменности структуры образца и геометрии системы источник возбуждения – образец – приемник сигнала [54].

Исследованиям структурного шума и разработке мер по уменьшению его влияния на полезный сигнал посвящен ряд работ [85 - 88].

В работе [87] рассматривается преимущество ультразвукового импульсного эхо-метода для визуализации внутренней структуры неоднородных материалов при одностороннем подходе к ним. Дан анализ длительности зондирующего сигнала с точки зрения минимизации влияния структурного шума. Дается его математическое представление как множество подобных сигналов со случайными задержками и амплитудными множителями, зависящими от величины задержки, так как большей задержке отвечает больший пройденный сигналом путь в объекте контроля и большее количество переотражений от его неоднородностей.

В работе отмечается, что структурная реверберация представляет собой многократные переотражения ультразвуковых волн между элементами крупного заполнителя, сопровождающиеся взаимной трансформацией продольных колебаний в поперечные и обратно. Как правило, размеры отдельных элементов заполнителя и расстояния между ними соизмеримы с длиной ультразвуковой волны, поэтому энергия зондирующего импульса в

основном рассеивается на неоднородностях, расположенных в окрестности точки излучения, и лишь частично расходится к более удаленным слоям материала. Реализации структурного шума, получаемые от повторных зондирований при неизменных положениях излучателя и приемника ультразвука, из-за стационарности среды полностью коррелированы между собой в совпадающие моменты времени. Однако при смене положений точек излучения и приема корреляция нарушается.

Описывается пространственная селекция отражателей при ненаправленных ультразвуковых преобразователях путем многоракурсного зондирования каждой точки исследуемого полупространства с его поверхности. Этот метод, находящий в последнее время применение при контроле мелкоструктурных материалов и в медицинской диагностике, физически аналогичен фокусировке ультразвукового излучения в каждую точку полупространства и фокусированному приему сигналов, отраженных от каждой зондируемой точки, и практически осуществляется путем сканирования поверхности полупространства ультразвуковыми преобразователями, синтезирующими приемно-излучающую апертуру больших волновых размеров. Данный метод синтезированной апертуры, фокусируемой в произвольную точку полупространства с когерентной обработкой данных, можно относить к одной из разновидностей многочастотной голографии. В литературе он известен как метод SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). Решение задачи обнаружения полезных сигналов на фоне структурного шума сочетается с решением задачи пространственной селекции отражателей методом SAFT. Реализация антенных решёток для проведения ультразвуковой томографии строительных конструкций приведена в работе [88].

Для пространственного накопления сигнала с целью увеличения отношения сигнал/шум требуется возможно большее число некоррелированных реализаций принятых колебаний, тогда как для

осуществления лишь пространственной селекции (при отсутствии помех) синтезируемая апертура может быть разреженной.

В работе указывается, что для получения наибольшего числа некоррелированных реализаций необходимо правильно выбрать шаг сканирования ультразвуковыми преобразователями поверхности полупространства при синтезе апертуры (или шаг антенной решетки) и размеры активной поверхности преобразователя (элемента решетки).

Работа [89] посвящена решению проблемы выделения полезного сигнала, возникающего при отражении зондирующего акустического сигнала от неоднородностей объекта исследования, на фоне структурного шума. Так как структурный шум оказывается сильно коррелированным с зондирующим сигналом и сигналом, отраженным от дефекта, его спектр почти совпадает со спектром «полезного» сигнала, существенно снижает эффективность применения частотных фильтров. В работе для выделения сигнала из структурного шума используется метод пространственно-временной обработки сигналов. Основное внимание в работе уделено оценке статистических характеристик структурного шума. В указанной работе произведена разработка эффективных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов для задач ультразвуковой дефектоскопии материалов и объектов со сложной неоднородной структурой, позволяющих выделить сигнал из структурного шума.

2.3 Описание аппаратного комплекса

Лабораторная установка для анализа дефектов методом механоэлектрических преобразований состоит из усилителя, компьютера, манипулятора и системы излучатель-приёмник. 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.

Исследования выполнены с помощью разработанного макета экспериментальной установки, который позволяет возбуждать объект контроля серией акустических импульсов и регистрировать электромагнитные отклики механоэлектрических преобразований. На рисунке 2.3 приведена структурная схема установки.

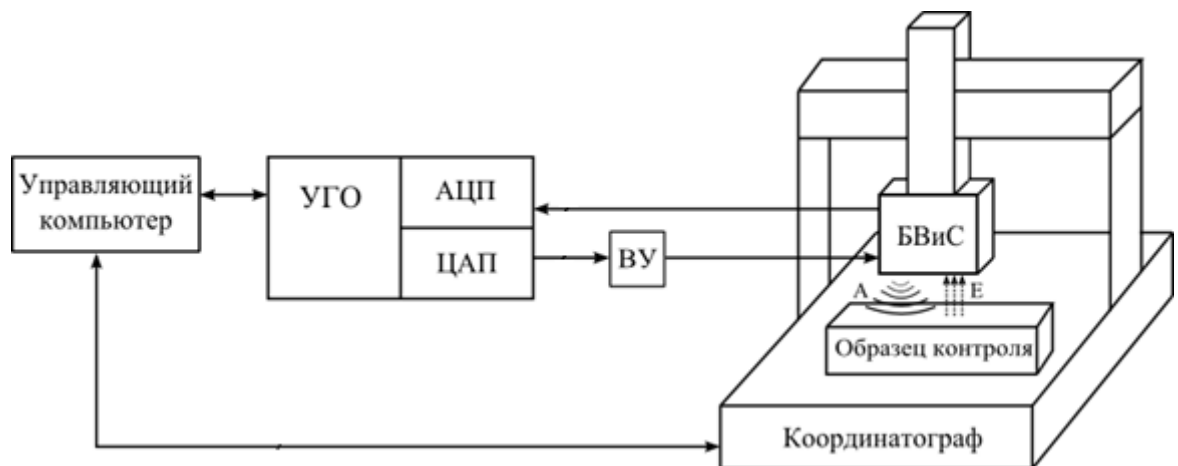


Рисунок 2.3 – Структурная схема установки

Координатограф позволяет позиционировать блок воздействия и съема (БВиС) 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. Выход оснащён аналогово-цифровым и цифро-аналоговым преобразователями (АЦП и ЦАП). Для повышения отношения сигнал/шум производилось многократное возбуждение образца (128 раз) и усреднение полученных откликов.

Экспериментальная установка имеет следующие характеристики:

- рабочее поле контроля - 600х900 мм;
- максимальная высота образца - 200 мм;
- точность позиционирования - 20 мкм;
- амплитуда напряжения на пьезоэлектрическом излучателе - до 200 В;
- количество каналов регистрации - 6;
- чувствительность канала регистрации - 4 мкВ;
- диапазон частот анализа сигналов - от 1 до 200 кГц;
- частота дискретизации АЦП и ЦАП - 1 МГц;
- динамический диапазон не менее 96 дБ.

БВиС перемещался координатографом над образцом по всей поверхности, шаг перемещения выбирался отдельно для каждого эксперимента, наиболее используемый шаг при сканировании составил 5мм. В каждой точке измерения пьезоэлектрический излучатель прижимался к образцу с определенным усилием, и осуществлялось акустическое воздействие с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Для наилучшего акустического контакта излучателя с образцом использовалась смазка Литол-24.

Датчик состоит из металлической пластины, имеющей форму полумесяца (рис. 2.4). Измерительная располагается на высоте 1-2 мм над образцом и принимает совокупность полезного сигнала и помехи, тогда как другая – компенсационная, находится на высоте 1 см над поверхностью образца и принимает помеховую составляющую.



Рисунок 2.4 – фото нижней части блока возбуждения и съёма (БВИС)

Параметры измерений:

- частоты 100 - 300 кГц;
- размах напряжения на пьезоэлектрическом ударнике - 400 В;
- время развертки ЛЧМ сигнала - 75 мкс.
- усреднение – 128 - 256.

2.2 Описание программы работы установки

Программа управления установкой позволяет задавать различные параметры посылаемых сигналов: амплитуда, частота, Длительность импульса, период, смещение и другие. Пример диалогового окна установки параметров сигнала приведён на рисунке 2.5.

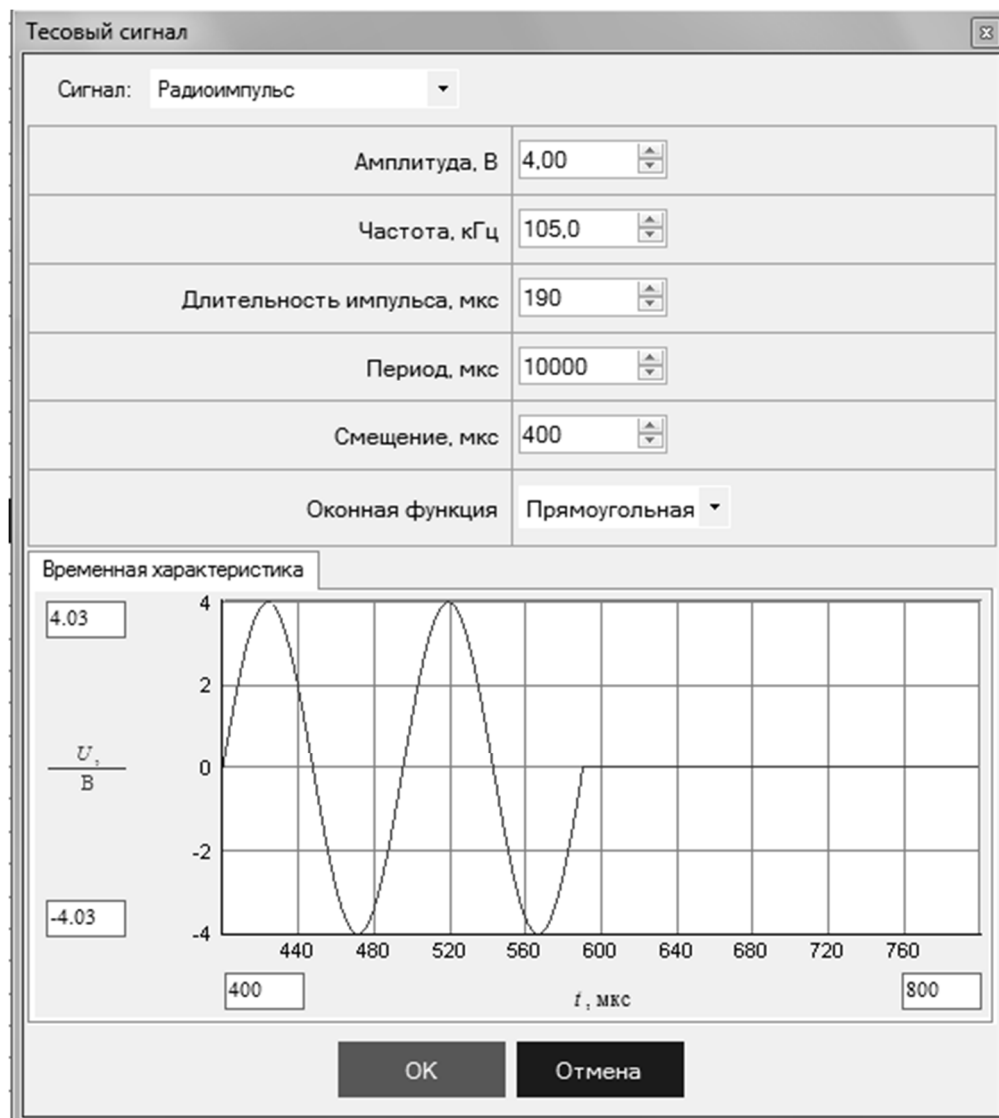


Рисунок 2.5 – интерфейс программы при формировании сигнала возбуждения

Амплитуда влияет на интенсивность сигнала, большая часть работ выполнялась при амплитуде 4В. при амплитудах ниже выделение сигнала из шума было затруднительно.

Рабочие частоты составляли от 100 до 300 Гц, на практике в основном применялись частоты, совпадающие с собственными резонансными частотами излучателя – 105 и 122 кГц для низкочастотных сигналов. Экспериментальным путём для высокочастотных исследований была выбрана частота 290 кГц.

Длительность импульса выбиралась так, чтобы в соответствии с частотой сигнал состоял из целого числа периодов. Например, при частоте 105 кГц и длительности сигнала 19 мкс волна содержала 2 полных периода.

Параметр «период» задаёт периодичность отправки сигнала в образец. Большинство исследований в рамках данной работы проводилось для сигналов-откликов полученных после отправки единичных импульсов, однако исследований повторных импульсов было необходимо для оценки изменения формы сигнала после прохождения образца со временем. В связи с частотно-зависимым затуханием сигнала, необходимо предсказывать изменения параметров сигнала со временем.

Параметр «смещение» задаёт исходную задержку по времени, позволяя избежать шумов и краевых эффектов при старте измерений.

На рисунке 2.6 представлено изображение программы в работе. (На рисунке стрелками отобразить сигналы) Красным обозначен текущий сигнал, синим – сумма заданного числа сигналов, в большинстве случаев суммирование проводилось по 128 или 256 сигналам. Это позволяет минимизировать нестационарные шумы. Желтым обозначен встроенный в программу фильтр, однако в данной работе он не использовался, так как проводилась последующая математическая обработка сигналов.

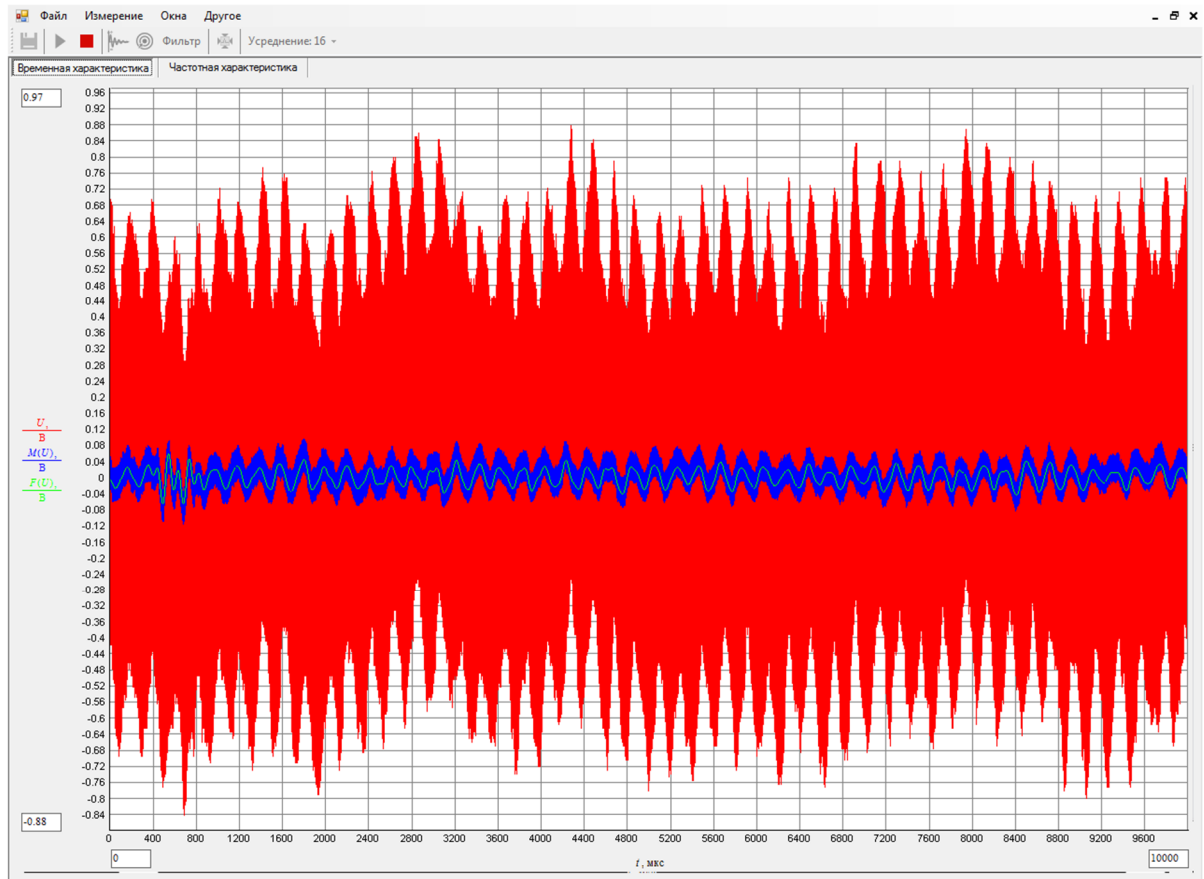


Рисунок 2.6 – Окно вывода временной реализации сигнала-отклика. Красный – мгновенное значение, синий – усреднённое, жёлтый – после применения фильтра

2.4 Образец

В рамках данной работы основной массив данных был получен при работе с образцом из цементно-песчаной смеси размером 300x300x100 мм. Фото образца приведено на рис. 2.7.

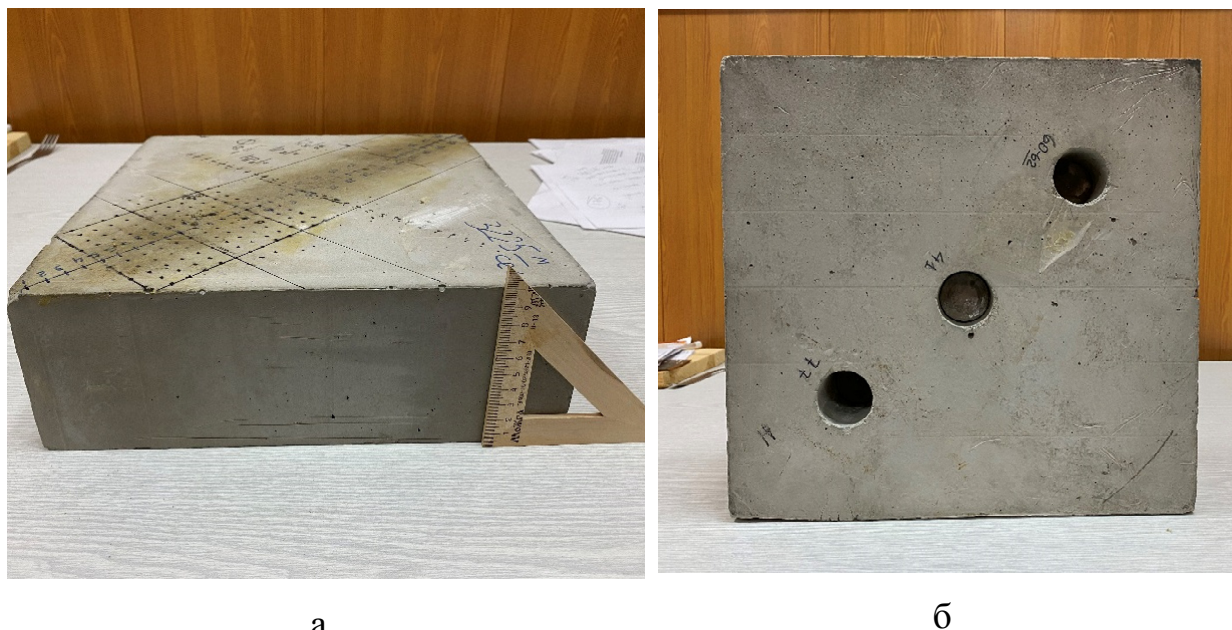


Рисунок 2.7 – Фото образца с модельными дефектами

Для образца заранее измерена скорость распространения звука – 3300 м/с. Материал подобран из соображений наиболее вероятного состава конструкций, для контроля которых может применяться метод МЭП. В ходе работы так же были проведены измерения на образцах из эпоксидной смолы и других неметаллических материалов.

Размеры образца достаточно массивны, что связано с тем, что отражённый от боковых границ и дна образца сигнал накладывается на сигнал, отражённый от дефекта, что существенно затрудняет оценку глубины залегания.

Модельные дефекты выполнены в виде трёх цилиндрических отверстий диаметром 35 мм и глубинами залегания 40, 60 и 25 мм.

2.6 Параметры измерений

В ходе предварительных исследований проводилось возбуждение образца сигналами разных частотных диапазонов и длительностей. Эмпирическим путём были выявлены наборы параметров, дававшие наиболее

информативные результаты. В качестве возбуждающих импульсов выступали отрезки синусоид различных частот и длительностей. Параметры приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры экспериментов

Частота, кГц	105	140	290
Число периодов	1, 2, 8	10	25

Сканирование производилось с шагом 10 мм.

В качестве образца был использован параллелепипед из цементно-песчаной смеси размером 300х300х100 мм, в котором были высверлены 3 отверстия глубиной 80 мм, 60 мм и 40 мм по одной линии. Образец помещался в экспериментальную установку для исследования образца методом механо-электрических преобразований, которая позволяет производить сканирование системы излучатель-приемник для одностороннего контроля.

На рисунке 2.8 показан разрез, проведенный по линии центров отверстий.

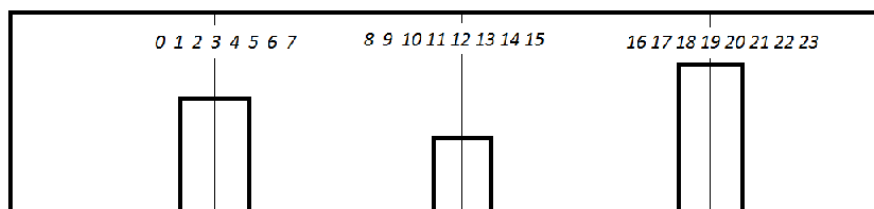


Рисунок 2.8 – схематическое изображение образца с модельными дефектами и позициями сканирования

На том же рисунке показаны позиции, в которых осуществлялся цикл возбуждения-измерения.

Для повышения отношения сигнал/шум в каждой позиции осуществлялись повторные возбуждения, а отклики усреднялись с использованием внутренней программы обработки.

Для контроля степени затухания сигнала отклика во времени каждая серия возбуждения повторялась через 1 мс.

Полученные усредненные реализации подвергались фильтрации для устранения как низкочастотных, так и высокочастотных помех.

2.6 Выводы по главе 2

1. Для проведения исследований использована установка, реализующая метод механоэлектрических преобразований с односторонним доступом, позволяющая производить сканирование по поверхности образца.
2. Обоснован выбор оптимального диапазона частот возбуждения диапазона с учетом частотно-зависимого затухания, а также дифракционных явлений, определяемых соотношением длин волн частотных составляющих импульса возбуждения с линейными размерами отражающей поверхности контролируемого макродефекта
3. Для существенного уменьшения влияния шумов предусмотрено многократное возбуждения образца с использованием прецизионного генератора формы импульса и автоматическое усреднение откликов при неизменном положении блока возбуждения и съёма.
4. Выбран оптимальный шаг сканирования при исследовании откликов от искусственных дефектов в виде торцевых поверхностей глухих отверстий разной глубины, высверленных в образце с обратной стороны поверхности измерения.
5. Размеры изготовленного образца из цементного камня с искусственными дефектами выбраны такими, чтобы избежать влияния отраженного от боковых граней акустического сигнала на отраженный от соответствующего дефекта.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ МАКРОДЕФЕКТОВ

В данной 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.

3.1 Оптимизация спектра возбуждения

Автором на разработанной им математической модели выявлены следующие факторы, влияющие на деформацию формы отклика:

1. Размеры поверхностей источника возбуждения, контактирующего с ОК, отражающей поверхности макродефекта, а также поверхности приемника сигнала отклика. При этом было показано, что чем больше линейные размеры поверхности дефекта при равной глубине залегания, тем больше искажение сигнала отклика, выражавшееся в затягивании фронтов.

2. Частотно-зависимое затухание, выражающееся в том, что спектральные составляющие импульса возбуждения затухают с расстоянием, пройденным лучом возбуждения, по закону примерно пропорционально квадрату частоты.

Кроме того, имеет место дифракционный фактор соотношения размеров отражающей поверхности с длиной волны спектральных составляющих

импульса возбуждения, который задает сечения обратного рассеяния. Чем это соотношение меньше, тем меньше уровень отраженного сигнала. В таком случае указанный фактор ведет себя как фильтр низкой частоты. Указанные факторы необходимо иметь в виду при выборе размеров излучателя и приемника, при выборе частотных характеристик импульса возбуждения в зависимости от предполагаемых размерах макродефекта и глубины его залегания. Для уменьшения влияния частотно-зависимого затухания и дифракционных эффектов на форму сигнала отклика необходимо оптимизировать спектр (форму) импульса возбуждения.

На рис. 3.1 приведены временные графики откликов в точках под номерами 5 при возбуждении частотой 105 кГц длительностью 1 период, форма исходного импульса, а также отклик импульса, прошедшего путь в течение 1 мс.

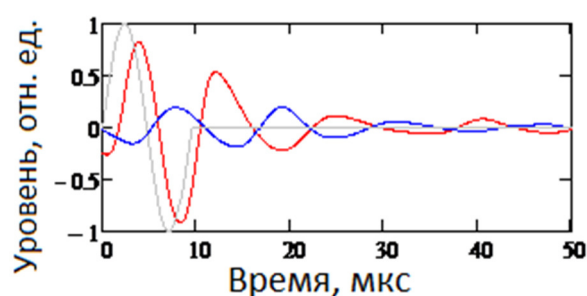


Рисунок 3.1 – Исходный отклик (серый), акустический сигнал в точке возбуждения (красный), отклик через 1 мс после момента возбуждения (синий)

Как видно из рисунка, импульс отклика несколько отличается от исходного. Это можно объяснить влиянием переходного процесса при преобразовании электрического сигнала в акустический в пьезопреобразователе излучателя. Из графика видно также, что по истечении времени в 1 мс при прохождении по образцу амплитуда отклика на частоте 105 кГц затухает примерно в 4 раза. Вследствие частотно-зависимого затухания из-за относительно большой ширины частотного спектра отклика форма отклика существенно деформируется. Это видно на графике амплитудно-

частотных характеристик (рис. 3.2) исходного сигнала, сигнала отклика и акустического сигнала, прошедшего по образцу в течение 1 мс с момента возбуждения.

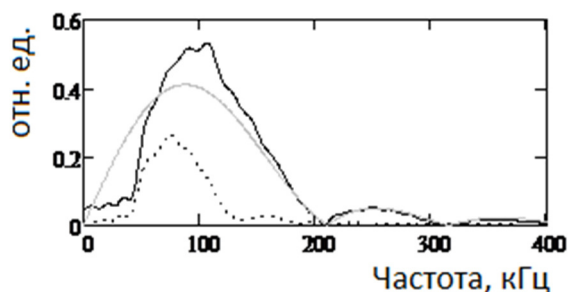
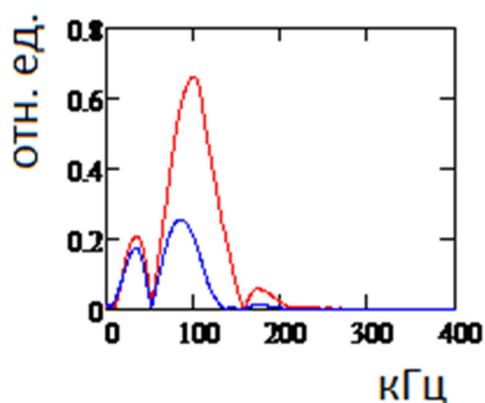
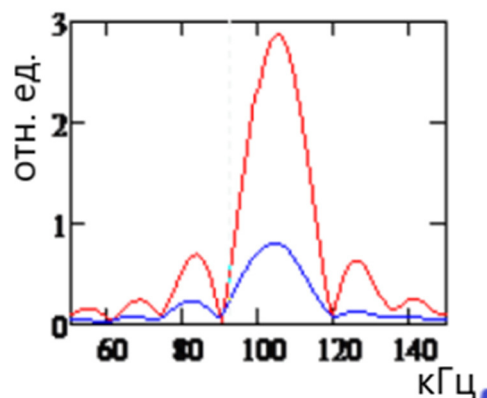


Рисунок 3.2 – АЧХ исходного импульса (серым), после отражения от дефекта (сплошная) и после прохождения волны возбуждения пути по образцу в течение 1 мс (пунктирная линия)

По мере увеличения числа периодов длительности импульса возбуждения смещение максимумов сдвигов, соответствующих АЧХ уменьшается как видно на рисунке 3.3.



а) 2 периода



б) 8 периодов

Рисунок 3.3 – Амплитудно-частотные характеристики первичного(красный) и вторичного(синий) сигналов

На рис. 3.4 приведены временные графики откликов и их АЧХ в точке под номером 5 при возбуждении частотой 140 кГц длительностью 10 периодов, а также АЧХ акустического импульса, прошедшего путь 38м при скорости звука в образце 3800 м/с. Амплитуда последнего увеличена на

временном графике в 10 раз, а АЧХ - в 5 раз. Расчеты показали, что на данной частоте уровень сигнала уменьшается в 30 раз.

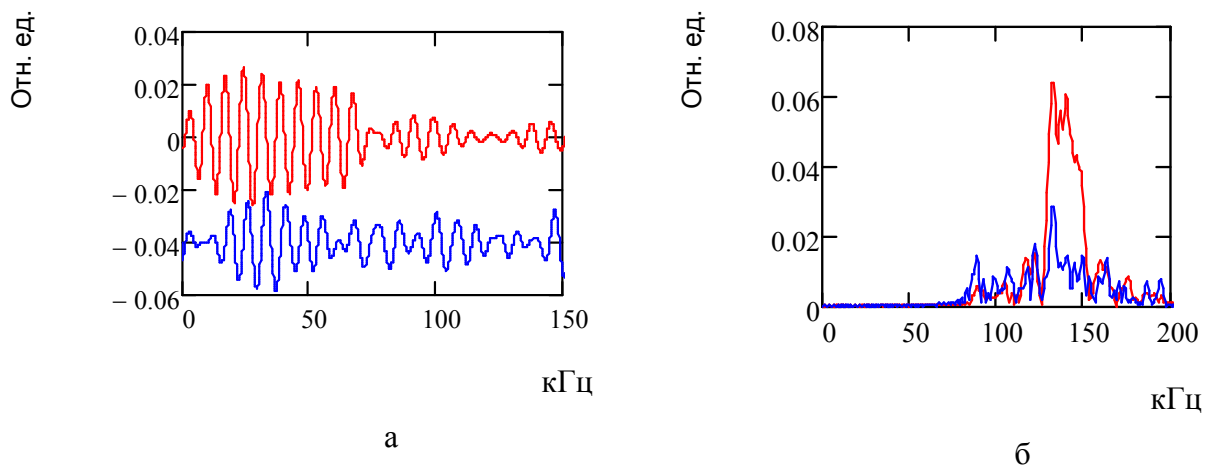
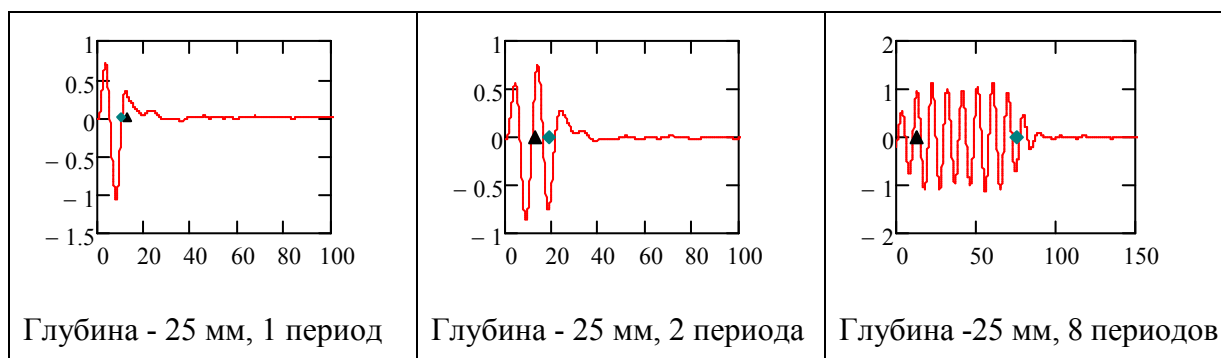
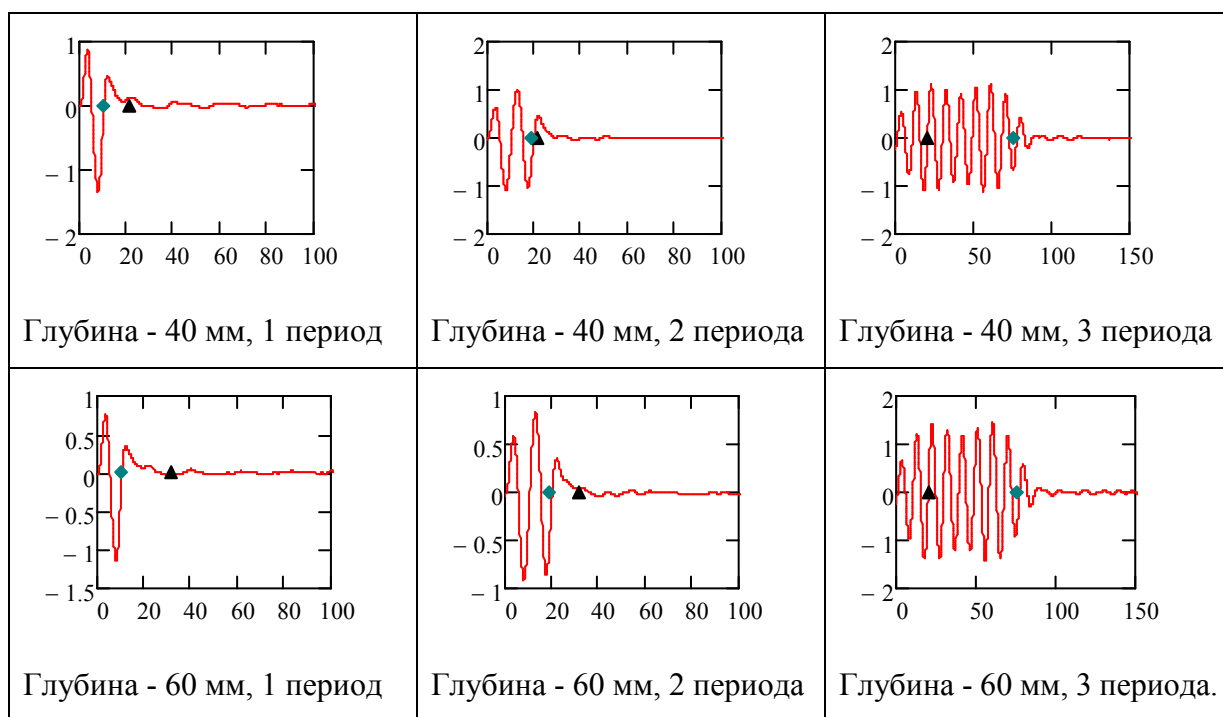


Рисунок 3.4 – временные графики откликов(а) и их АЧХ(б) при возбуждении частотой 140 кГц длительностью 10 периодов (красным), а также АЧХ акустического импульса, прошедшего путь 38м при скорости звука в образце 3800 м/с (синим)

В таблице 3.1 приведены выборки временных реализаций откликов на частоте возбуждения 105 кГц с длительностями в 1 период, 2 периода и 8 периодов в областях включений 25 мм (верхний ряд), 40 мм (средний ряд) и 60 мм (нижний ряд). По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс. На графиках нанесены также временные метки. Треугольник обозначает момент времени достижения отраженной от соответствующего включения акустической волны области приемника. Ромб обозначает длительность импульса возбуждения;

Таблица 3.1 – выборки временных реализаций откликов.





Как следует из рисунков, уровень откликов на частоте радиоимпульса возбуждения в 105 кГц после достижения отраженного сигнала приемника имеет весьма малый уровень по сравнению с исходным сигналом.

На рис. 3.5 приведены выборки временных реализаций откликов.

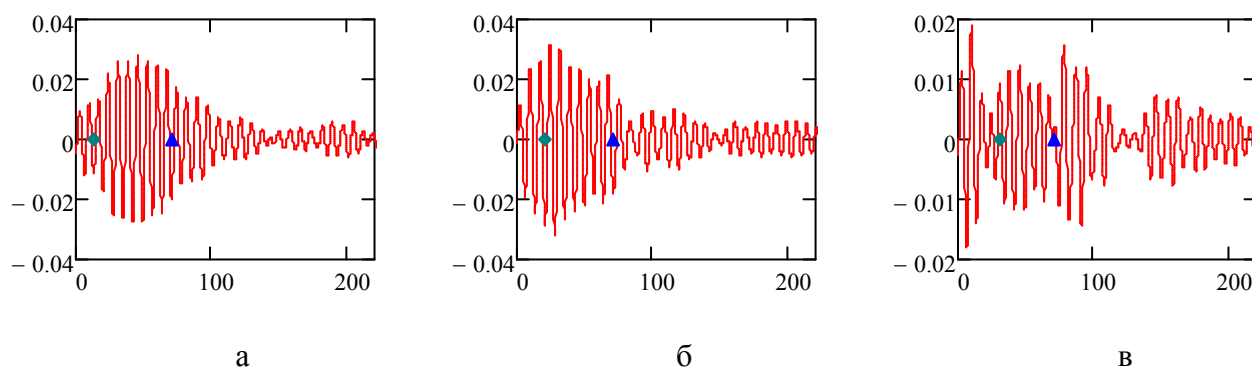


Рисунок 3.5 – выборки временных реализаций откликов на частоте возбуждения 140 кГц с длительностью в 10 периодов, в областях включений 25 мм (а), 40 мм (б) и 60 мм (в)

На графиках нанесены также временные метки. Треугольник обозначает момент времени достижения отраженной от соответствующего включения акустической волны области приемника.

Как видно из графиков отраженные отклики соизмеримы по уровню с начальными сигналами откликов.

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:

$$sh(t) = s(t) + i \cdot \text{hilbert}(s(t)) \quad (3.1)$$

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

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

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

$$\varphi(t) = \arctg\left(\frac{\text{hilbert}(\varphi(t))}{\varphi(t)}\right) \quad (3.2)$$

3.2 Использование метода корреляционного анализа для численной оценки глубины залегания дефекта.

Корреляционный анализ производился по методу скользящего окна. Для этого на амплитудно-временной характеристики 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.

Для поиска информационных параметров корреляционных зависимостей в условиях, когда отклик во времени перекрывается исходным акустическим сигналом, была разработана следующая математическая модель.

3.2.1 Математическая модель корреляционного анализа.

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. Параметры импульсов: длительность 10 периодов соответствующей частоты, относительная амплитуда начального импульса 1, сдвинутого - 0.1. Было задано время сдвига длительностью 35 мкс.

Суммарные исходный и сдвинутый импульсы послужили моделью отклика сигнала, отраженного от поверхности включения.

Были рассчитаны огибающие с использованием преобразования Гильберта.

В программе предусмотрено варьирование величиной смещения, а также амплитудой смещенного импульса, предусмотрено задание частоты заполнения радиоимпульсов, а также уровни шума заданной интенсивности.

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. Для выявления с изменений в кривых корреляционных зависимостей в программе предусмотрено их численное дифференцирование.

На рис. 3.6 отображены огибающие радиоимпульсов (серые линии) и их корреляционные зависимости (черные линии) с частотой заполнения 105кГц (слева) и 140кГц (справа).

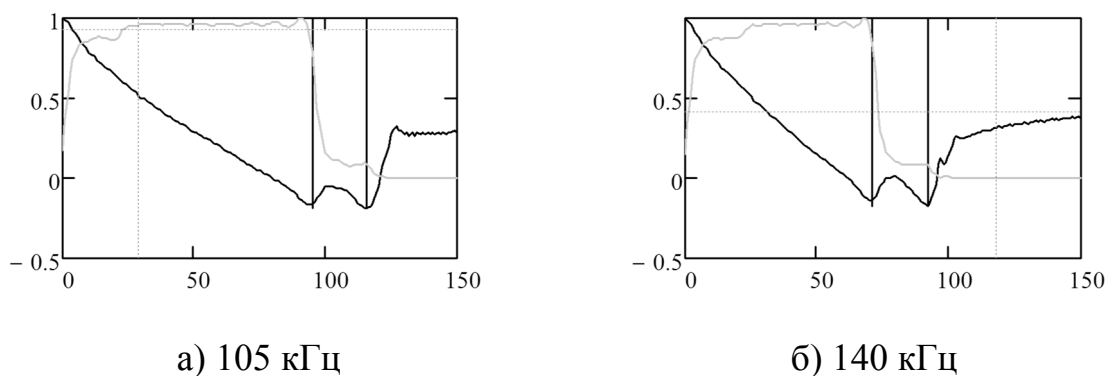


Рисунок 3.6 – Огибающие радиоимпульсов модельного сигнала отклика и их корреляционные зависимости для посылаемых сигналов частотой 105 кГц(слева) и 140 кГц(справа). По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс.

На графиках обозначены вертикальными линиями моменты окончания импульса возбуждения (левая линия), также время завершения суммарного импульса (правая линия). 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 по формуле

$$h = t * v / 2 \quad (3.3)$$

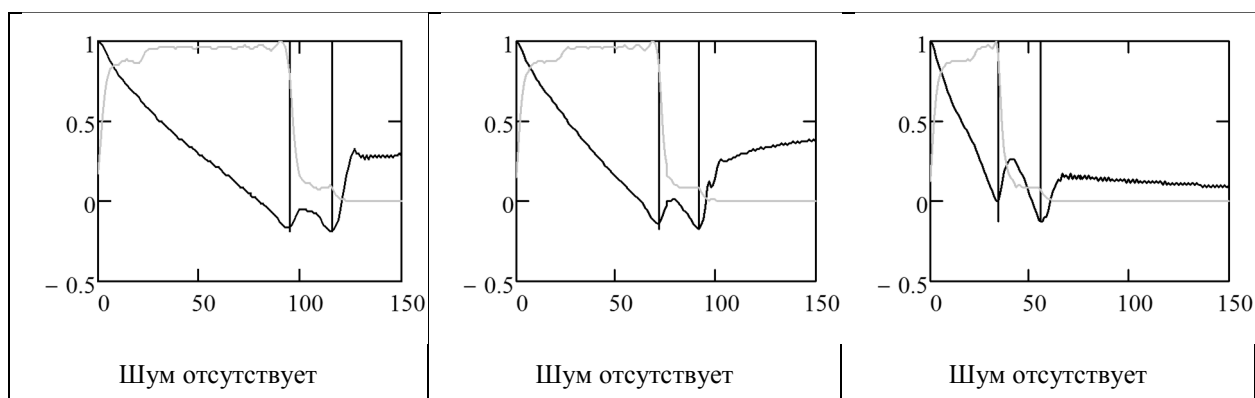
Где v – продольная скорость звука в исследуемом образце.

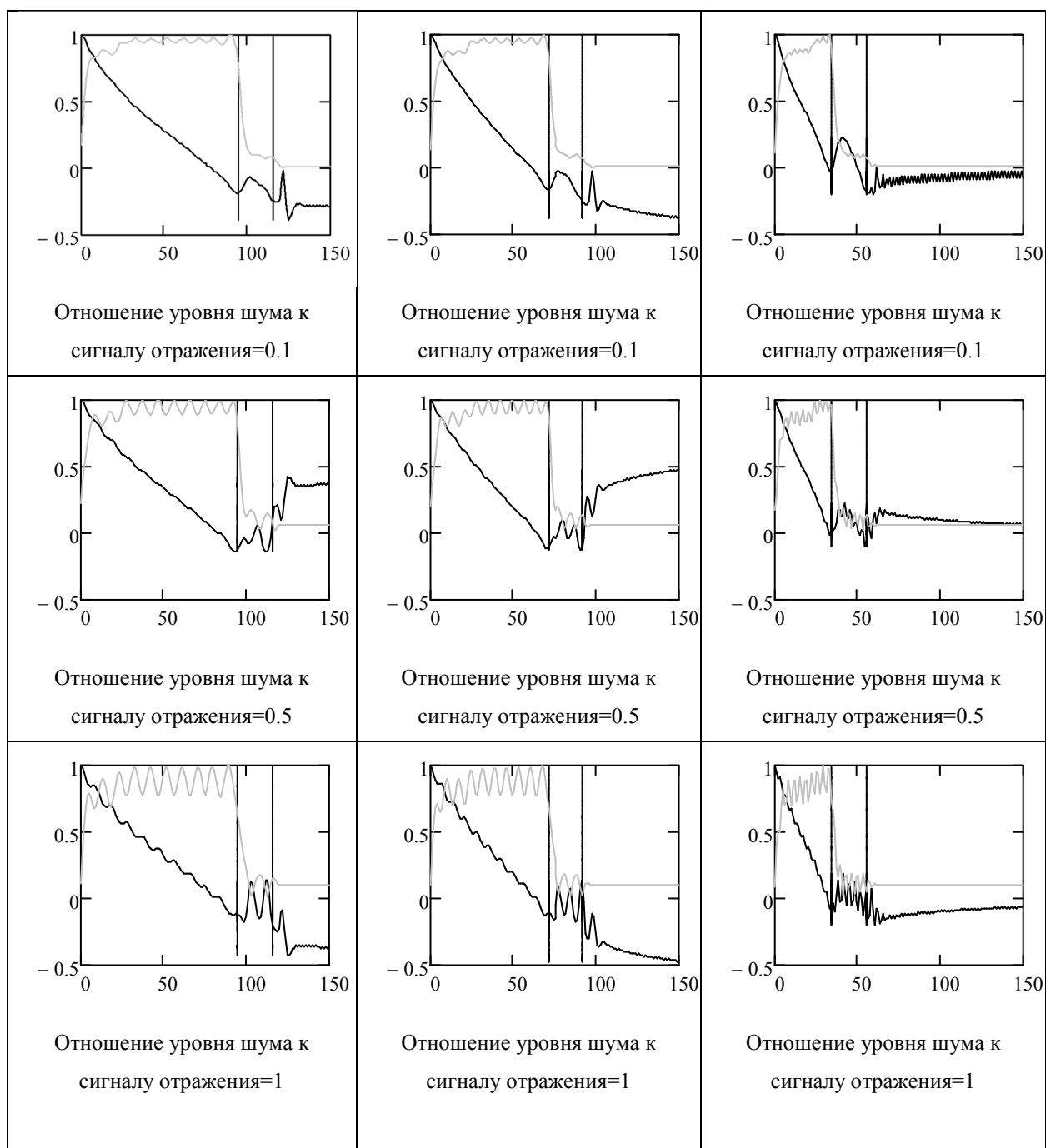
Таким образом, моделирование показало принципиальную возможность рассчитывать глубину залегания искомого макродефекта по параметрам корреляционного анализа огибающей аналитического сигнала отклика методом скользящего окна.

Были рассчитаны корреляционные зависимости согласно математической модели для радиоимпульсов на 3-х частотах, которые представлены в таблице 3.2: 105 кГц (левый столбец), 140 кГц (средний столбец) и 290 кГц (правый столбец) в условиях различного уровня шумов.

На графиках отображены огибающие радиоимпульсов (серые линии) и корреляционные зависимости (черные линии). Вертикальными линиями отображены границы длительности импульсов возбуждения (левая) и границы откликов (правая). Расстояние между вертикальными линиями характеризует время пробега акустической волны от источника до приемника при ее отражении от макродефекта. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс.

Таблица 3.2 - Корреляционные зависимости





Как видно из рисунков, по мере возрастания уровня шума возникает неопределенность в оценке длительности суммарного сигнала по изломам корреляционных зависимостей.

Уровень шума относительно уровня отраженного сигнала для надежной оценки глубины залегания макродефекта не должен превышать 0.5.

Разработанная математическая модель создана без учета искажения формы импульса отклика, обусловленного геометрическими размерами поверхностей источника импульса возбуждения, приемника сигнала,

размерами отражающей поверхности макродефекта, а также частотно-зависимым затуханием.

Такой подход, использующий корреляционный анализ, был применен для оценки глубин залегания макродефектов в экспериментах по анализу откликов при сканировании образца с использованием метода механоэлектрических преобразований.

3.2.2 Анализ корреляционных зависимостей по экспериментальным данным

Макродефекты представляют собой глухие отверстия в тыльной стороне образца из бетона толщиной 100 мм. Диаметры отверстий составляют 35 мм. Глубины отверстий составляют (75, 60, 40) мм. Т.е. глубины залегания от поверхности образца со стороны системы излучатель – приемник составляют соответственно (25, 40, 60) мм. Сканирование проводилось в окрестностях дефектов по прямой линии с шагом в 10 мм.

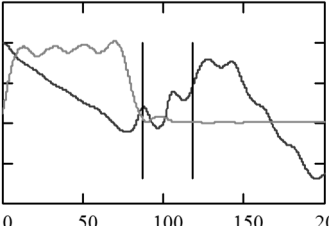
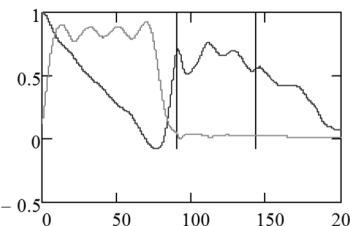
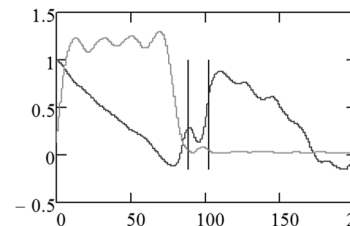
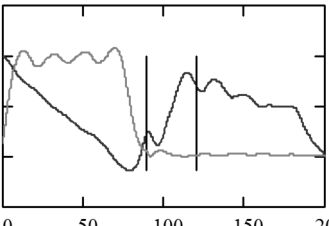
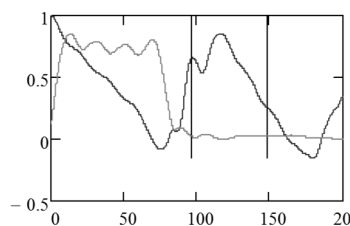
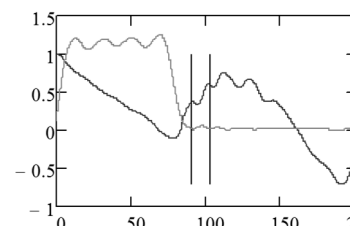
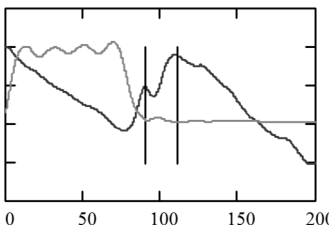
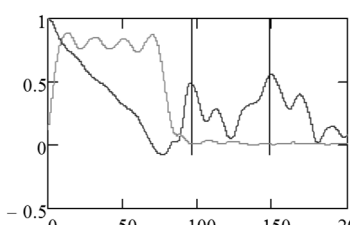
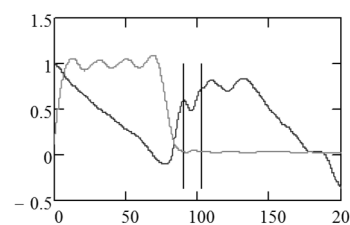
Было произведено сканирование в каждой позиции, указанной на рис.3.1. Позиции от 0 до 7 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 40 мм, позиции от 8 до 16 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 60 мм и позиции от 17 до 23 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 25 мм. Позиции, в которых расстояние от системы излучатель – приемник минимально до соответствующего отверстия следующие: позиция 5 для дефекта с глубиной залегания 40 мм, позиция 13 для дефекта с глубиной залегания 60 мм, позиция 19 для дефекта с глубиной залегания 25 мм.

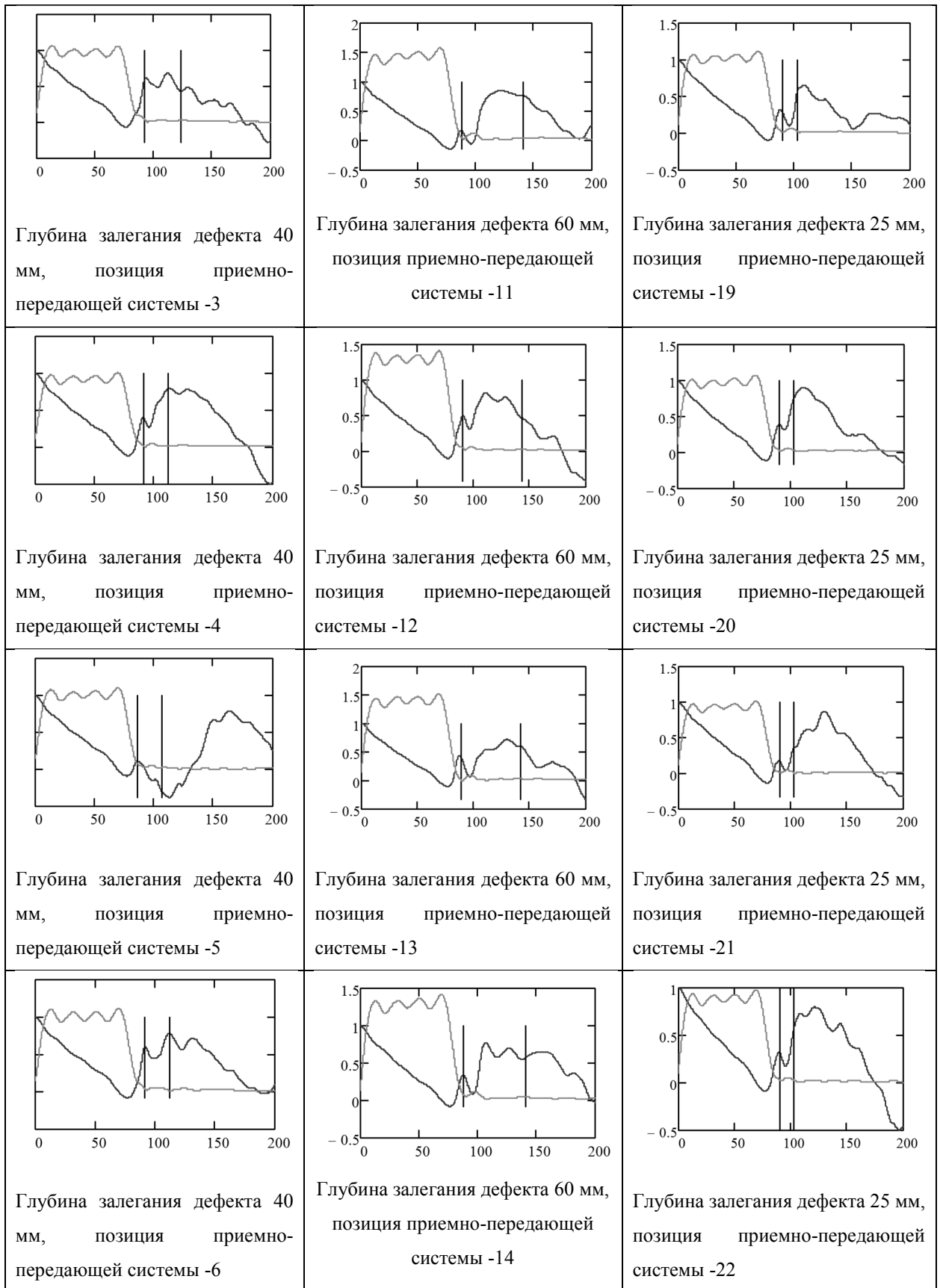
Графики всех корреляционных зависимостей сведены в таблицу.

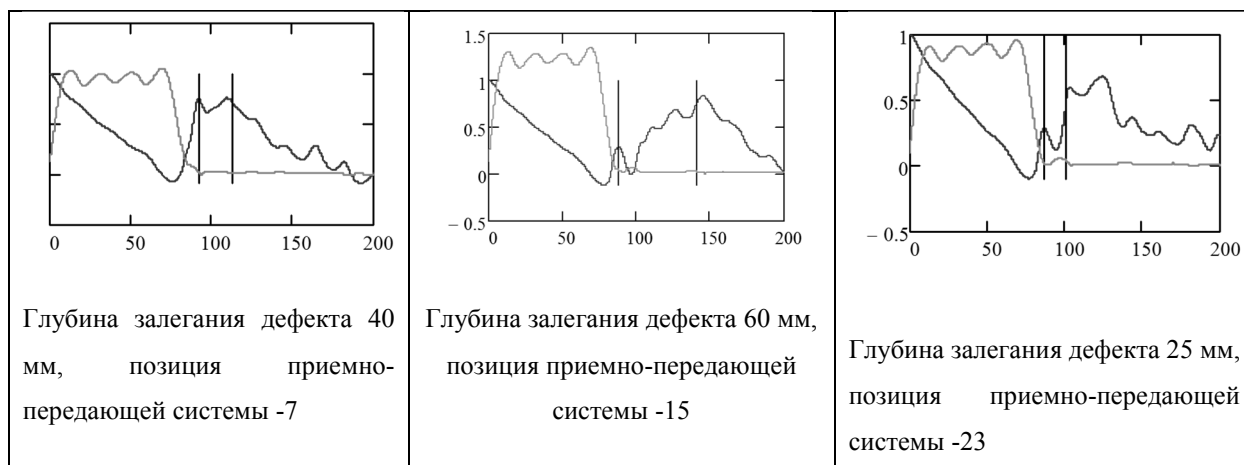
На графиках в таблице 3.3 приведены огибающие радиоимпульса с частотой заполнения 105 кГц. Левые вертикальные линии отмечают длительность импульса, средние - суммы длительности импульса и времени двойного пробега сигнала возбуждения от источника до приемника,

отраженного от дефекта, правые – отраженные от дна образца. Следовательно, интервал между левыми и средними вертикальными линиями характеризует глубину залегания дефекта. На каждом графике серой линией отображены огибающие радиоимпульса, сплошной линией корреляционные зависимости в заданных точках сканирования. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс.

Таблица 3.3 - Огибающие радиоимпульса

 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция приемно-передающей системы -0	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция приемно-передающей системы -8	 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция приемно-передающей системы -16
 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция приемно-передающей системы -1	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция приемно-передающей системы -9	 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция приемно-передающей системы -17
 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция приемно-передающей системы -2	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция приемно-передающей системы -10	 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция приемно-передающей системы -18





Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

В целом минимумы первых перегибов на всех кривых корреляционных зависимостей соответствуют времени окончания действия отклика. Хотя фактически за счет переходного процесса пьезоэлектрического процесса он затянут, как это видно на амплитудно-временных характеристиках аналитических сигналов. При глубине 25 мм залегания дефекта вертикальная линия на графике относительно минимума второго перегиба, как это следует из математической модели. Это можно объяснить тем, что при расчете суммарного значения длительности сигнала возбуждения и сдвига за счет отражения не учитывалось то, что источник возбуждения, поверхность объекта контроля приемник сигнала отклика не являются точечными. Вследствие их протяженности происходит затягивание импульса отклика. Это явление будет рассмотрено в разделе разработки одномерной математической модели формирования отклика.

При глубине 40 мм залегания дефекта явление затягивания практически не проявляется за исключением графика № 11 для позиции 3 рисунка 3.1.

При глубине залегания дефекта, равной 60 мм проявляются следующие особенности.

Так, на графиках под номерами 3, 6, 9 видно, что минимумы второго перегиба по мере приближения блока возбуждения и съёма сигнала к поверхности макродефекта смещаются к вертикальной линии, характеризующей окончание отклика. При дальнейшем движении (графики

11, 12, 13, 14) происходит удаление от указанного минимума. Это может свидетельствовать о том, что в позиции 10 расстояние между поверхностью дефекта и блоком излучатель – приемник наименьшее.

3.3 Использование фазового метода для численной оценки глубины залегания макродефектов.

Суть фазового метода заключается в том, временная реализация отклика радиоимпульса заданной частоты f для анализа преобразуется в аналитический сигнал. Затем вычисляются его фазовременная характеристика $\varphi(t)$ (3.2) 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.

$$\varphi_1(t) = \varphi(t) - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t, \quad (3.4)$$

Где f – частота заполнения радиоимпульса.

3.3.1 Модельный расчет фазовых характеристик

Для оценки возможности использования фазовых характеристик для решения поставленной задачи определения глубины залегания макродефекта, рассмотрим особенности фазового метода.

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 окончание действия импульса возбуждения и завершения действия отклика.

Была разработана соответствующая одномерная модель исследования фазовых характеристик

Для моделирования фазового метода анализа использовались следующие параметры, влияющие на фазовые характеристики:

- соотношение амплитуд исходного и отраженного сигналов;
- постоянная времени переходного процесса источника возбуждения;
- набор частот радиоимпульса: (105, 140, 290) кГц;
- уровень заданного шума;

Следует иметь в виду, что соотношение амплитуд при заданном уровне шума существенным образом влияет на чувствительность.

Скачок фазы можно оценить как изменение угла между векторами исходного и отраженного сигналов отклика в аналитическом представлении.

При наложении гармонических сигналов одинаковой частоты имеет значение, в каком фазовом соотношении они находятся. Если их фазы совпадают, фазового скачка не наблюдается. Если же имеет место сдвиг фаз

на 90° то происходит сложение ортогональных векторов. При этом главную роль начинают играть соотношения амплитуд. Элементарный расчет показывает, что при соотношении амплитуд 1 к 10 скачок фаз не превышает 6° . В условиях реального эксперимента фаза гармонического сигнала отклика относительно фазы начального сигнала зависит от пути, который прошла отраженная от дефекта гармоническая волна. По этой причине, по-видимому, не удалось надежно зарегистрировать скачки фаз в момент наложения отраженной волны на начальную.

Иное дело, когда происходит окончание действия начального сигнала, а действие отраженного еще продолжается. В этом случае есть надежда зафиксировать отчетливый скачок (особенно в момент окончания отклика).

Были смоделированы условия (рис. 3.7), когда отраженный сигнал с амплитудой 0.3 от исходного совпадает по фазе с исходным и когда фаза отраженного сигнала повернута на угол 90° .

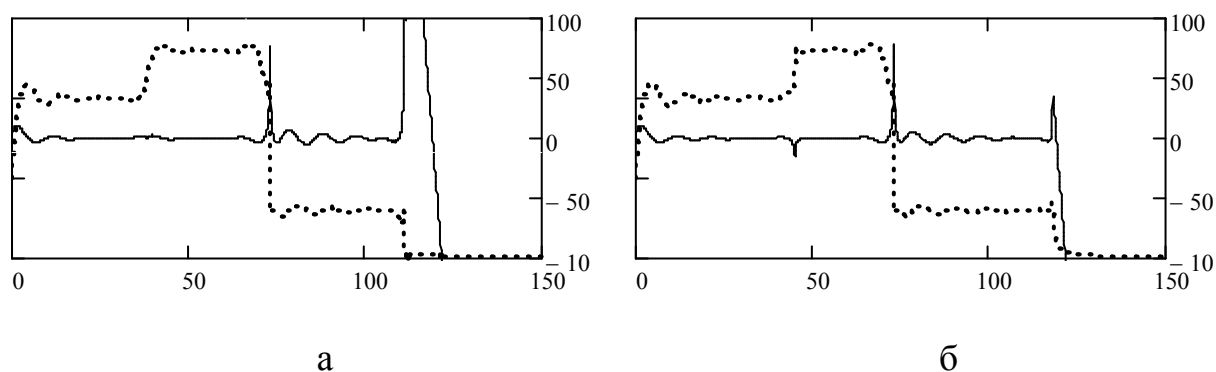


Рисунок 3.7 – Фазовые характеристики модели. Пунктирной линией нанесены огибающие полного отклика; сплошной линией обозначены мгновенные фазы фазовременной характеристики аналитического сигнала.

а - фаза отраженного сигнала совпадает с фазой исходного, б – фаза отраженного сигнала повернута на угол 90° . По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

На правой оси рисунков в градусах нанесены значения фаз. Уровень значения скачка фаз на правом рисунке составляет 12^0 .

Частота импульса возбуждения выбрана 105 кГц, время запаздывания отраженного сигнала - в диапазоне 35...45 мкс.

Из рисунков видно, что надежным критерием определения момента окончания действия сигнала отклика является излом фазы, обусловленный вторым слагаемым в формуле 3.4.

Для оценки влияния постоянных времени переходного процесса устройства возбуждения на фазовые характеристики были произведены расчеты откликов от воздействия исходно прямоугольного радиоимпульса с частотой заполнения 105 кГц при постоянных времени нарастания сигнала за счет источника возбуждения (1, 3, 5) мкс

На рис. 3.8 отображены фазовые характеристики при постоянных времени нарастания 1 мкс (а), 3 мкс (б) и 5 мкс (в).

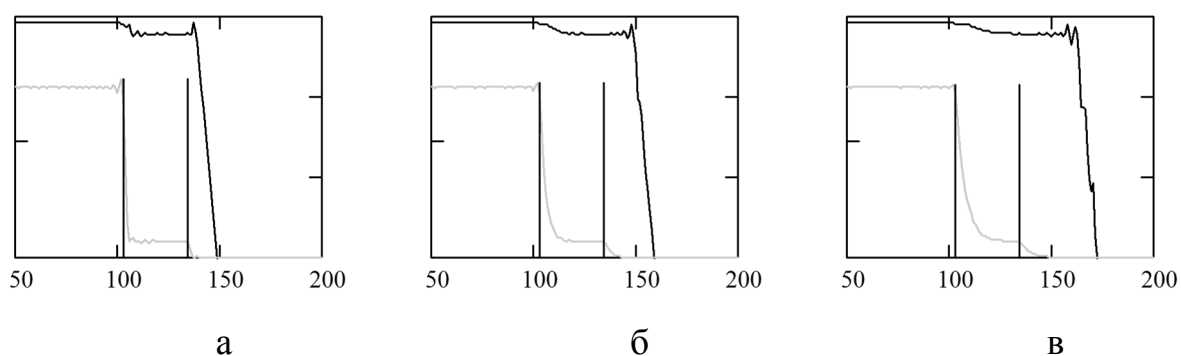


Рисунок 3.8 – Фазовые характеристики полного отклика с постоянными времени нарастания сигнала 1 мкс (а), 3 мкс (б), 5 мкс (в). На графиках серыми линиями обозначены огибающие откликов. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Для импульсов с другими частотами фазовые характеристики имеют те же особенности.

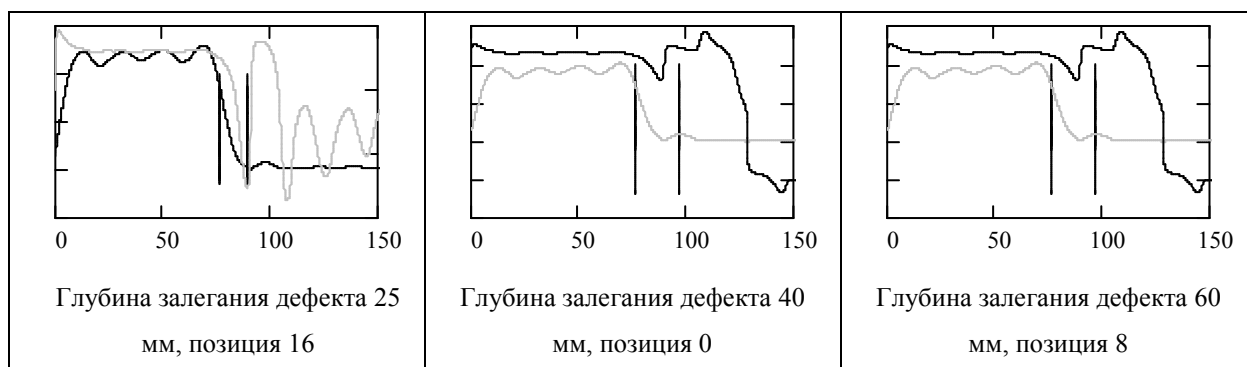
3.3.2 Анализ фазовых характеристик по экспериментальным данным.

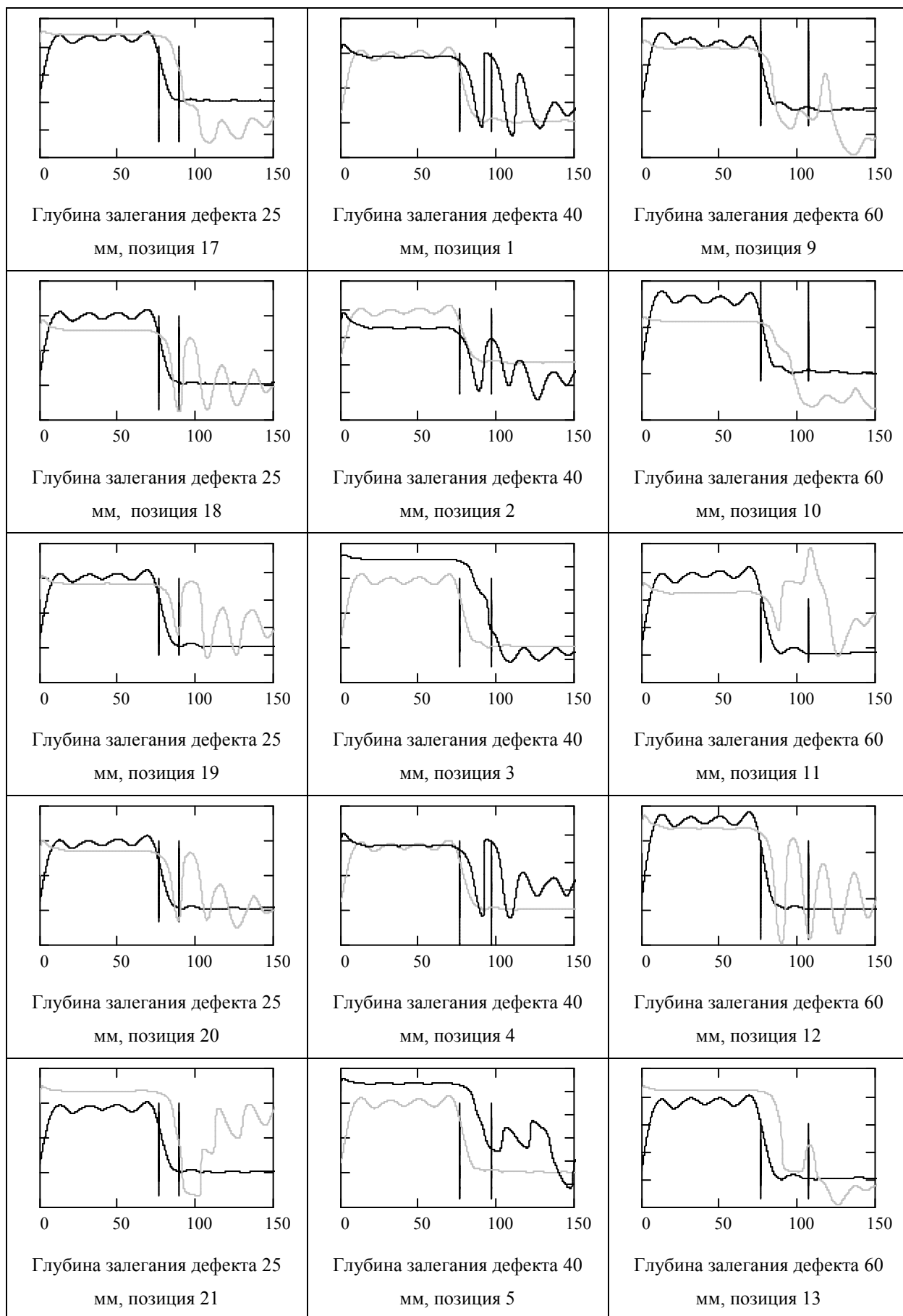
Было произведено сканирование в каждой позиции, указанной на рис. 3.1 Позиции от 0 до 7 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 40 мм, позиции от 8 до 16 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 60 мм и позиции от 17 до 23 соответствуют зоне дефекта, залегающего на глубине 25 мм. Позиции, в которых расстояние от системы излучатель – приемник минимально до соответствующего отверстия следующие: позиция 5 для дефекта с глубиной залегания 40 мм, позиция 13 для дефекта с глубиной залегания 60 мм, позиция 19 для дефекта с глубиной залегания 25 мм.

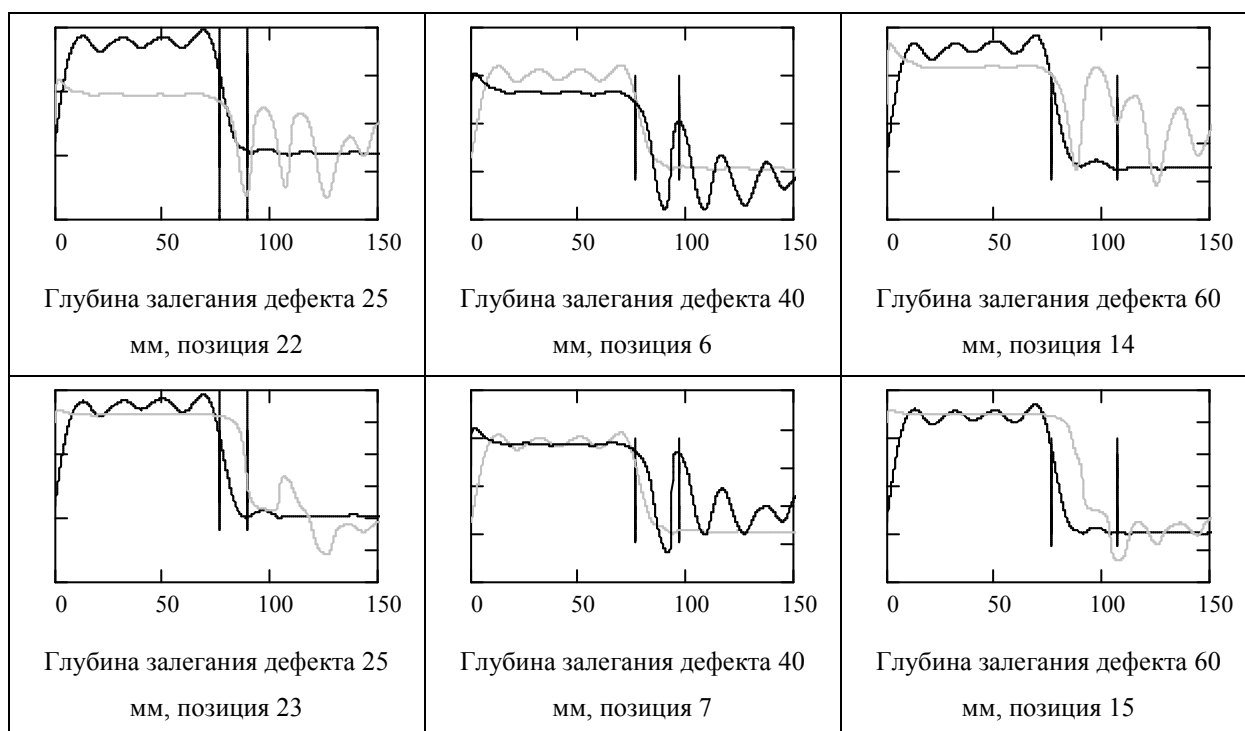
Графики всех корреляционных зависимостей при возбуждении прямоугольным радиоимпульсом с частотой заполнения 105 кГц сведены в таблицу.

На графиках в таблице 3.4 также 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. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс.

Таблица 3.4. Фазовые характеристики экспериментальных данных







Анализ полученных данных по фазовым характеристикам позволяет сделать следующие выводы.

Как видно из графиков фазовых характеристик откликов в районе дефекта с глубиной залегания 25 мм вертикальные линия суммарной длительности практически совпадает с первыми перегибами фазовых характеристики в позициях 16, 18, 19, 20, 22. В позициях 17, 21, 23 она находится на кривых резкого падения характеристик.

В районе залегания дефекта на глубине 40 мм вертикальная линия суммарной длительности находится в точках максимума фазовой характеристики после 1-го перегиба в позициях 1, 2, 4, 6, 7. В позиции 0 линия находится на горизонтальной полке после первого перегиба, а в позиции 3 - на характеристики.

При залегании дефекта на глубине 60 мм положения суммарной линии относительно фазовых характеристик следующие. В позициях 0, 4, 6, 7 линия суммарной длительности находится в минимуме 2-го перегиба; в позиции 1 она лежит на полке после первого перегиба, в позициях 3 и 5 – в максимуме после первого перегиба.

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 (выше об этом уже упоминалось. Для повышения надежности оценки глубины залегания дефектов в настоящей работе был разработан разностный метод.

3.4 Разностный метод оценки глубины залегания дефектов по фазовым характеристикам.

Суть метода заключается в следующем.

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 возникает возможность смоделировать акустический сигнал возбуждения, а затем вычесть его из реального исходного акустического сигнала. Остаточный сигнал будет содержать в себе отраженную составляющую отклика, а также структурный шум и контактные переходные характеристики системы поверхность образца – поверхность устройства возбуждения. В любом случае разностный сигнал будет иметь существенно меньшее отличие с отраженным сигналом, что должно повысить эффективность использования метода фазовых характеристик.

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

$$res(t, tau, a, f, fi) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - fi) \cdot (\Phi(t) \cdot ((1 - \exp(\frac{-t}{tau})) - \Phi(\frac{-t+q}{tau}) \cdot (1 - \exp(\frac{-t+q}{tau})))) \quad (3.5)$$

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 распределений.

На рис. 3.9 отображены импульсы подогнанной математической модели акустического начального импульса (а), реального акустического сигнала возбуждения (б) и разностный сигнал (в).

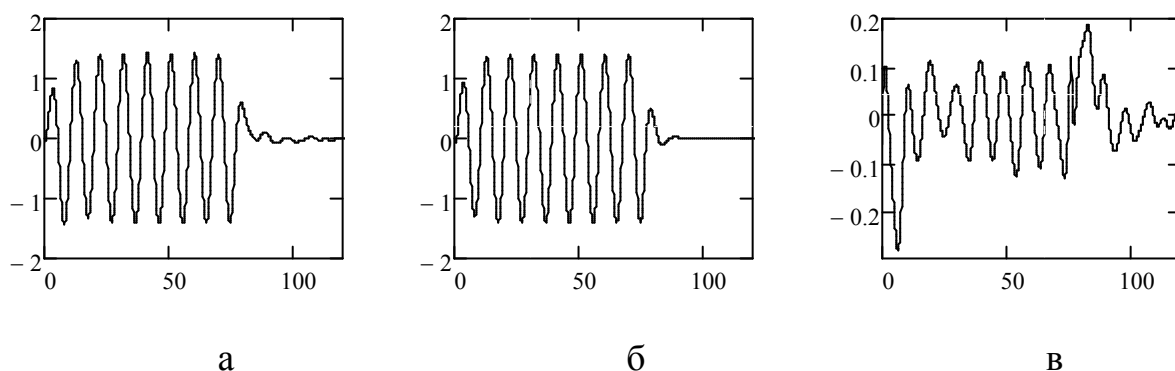


Рисунок 3.9 – модельный сигнал с учётом переходного процесса преобразователя(а), реальный сигнал, полученный сразу после возбуждения(б) и разностный(в) сигнал, полученный при вычитании первых двух. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс.

Как видно из разностного графика имеет место выброс сигнала при нарастании и при убывании. Это означает, что модель не совсем точно описывает реальный сигнал.

На рис. 3.10 отображены огибающие реального импульса отклика (сплошная линия) и модельного импульса (точечная линия). Как видно из рисунка при нарастании и убывании сигналов имеет место быстро затухающий колебательный процесс. Это может быть связано с собственными частотами устройства возбуждения, возникающими при генерации акустического импульса. Вследствие относительно небольшого уровня колебательной составляющей соответствующая поправка в модельный импульс не вводилась

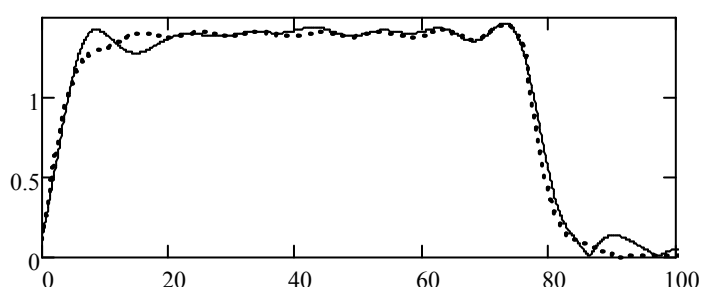
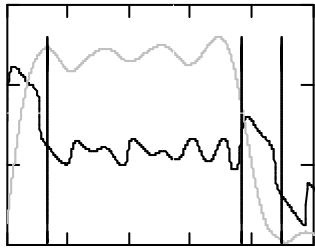
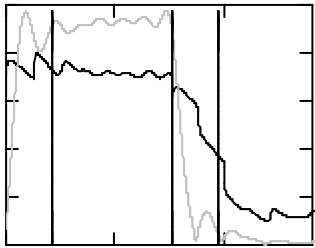
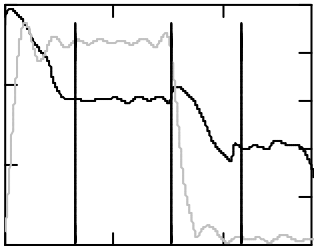
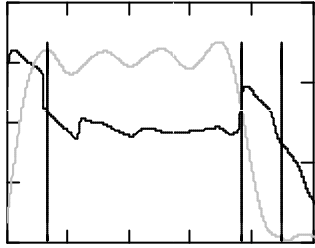
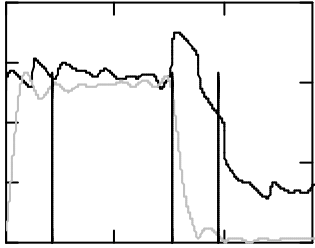
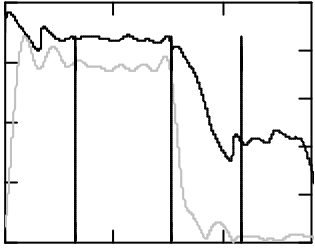
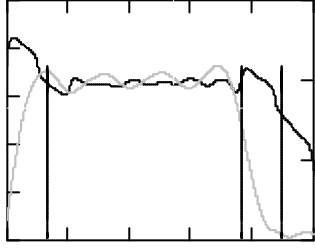
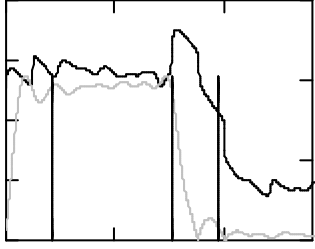
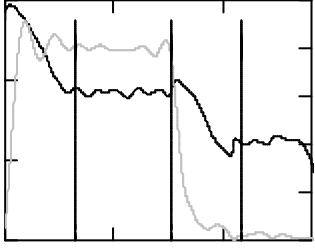
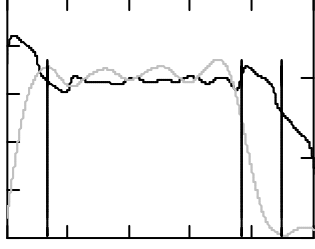
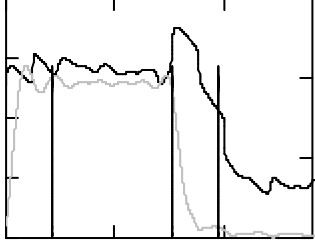
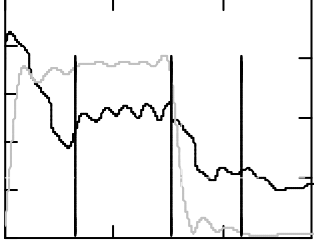


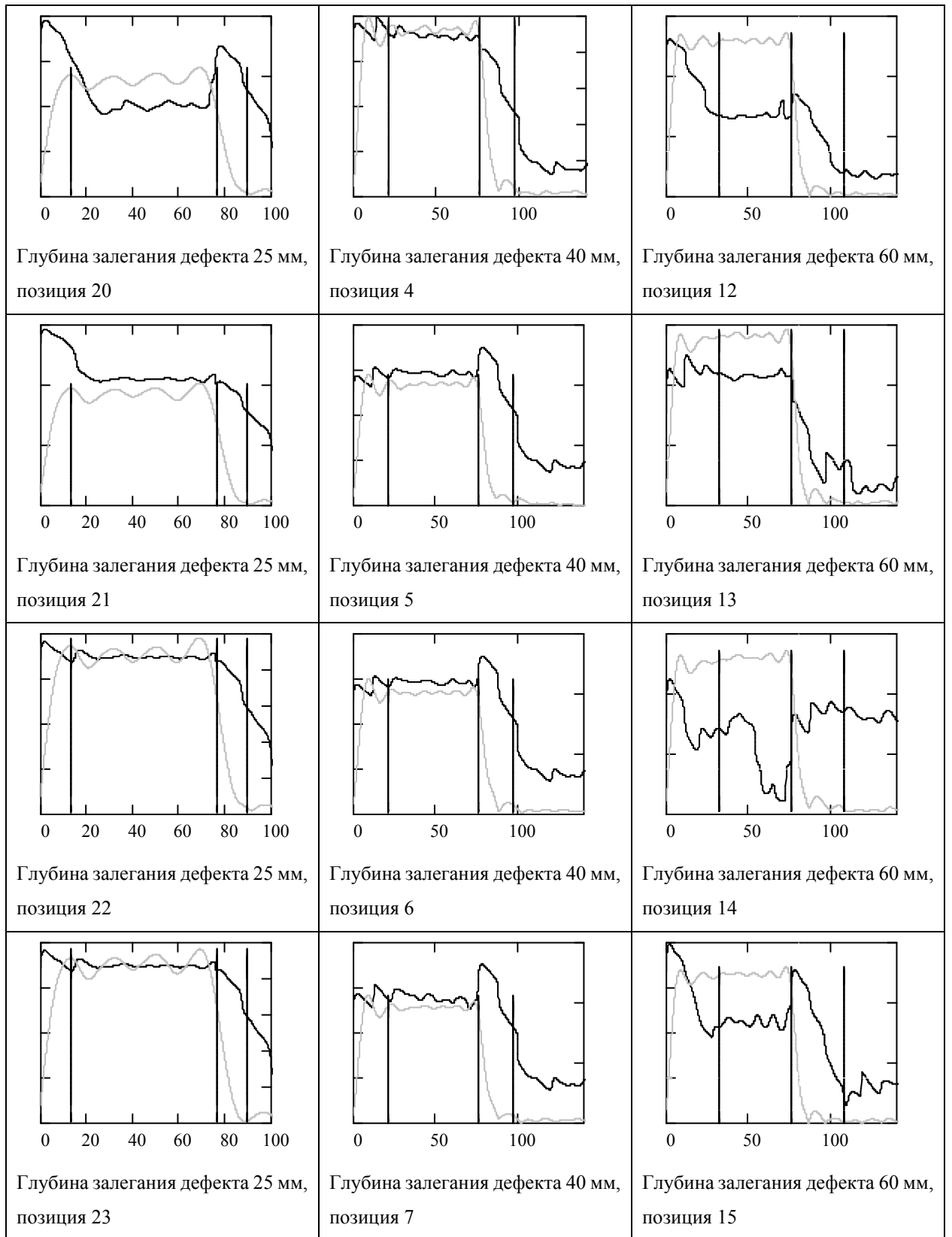
Рисунок 3.10 – Огибающие реального (сплошная линия) и модельного (точечная линия) импульсов возбуждения. По вертикальной оси – относительные единицы, по горизонтальной – время в мкс

Были вычислены фазовые характеристики разностных сигналов в каждой точке сканирования для радиоимпульсов с частотой 105 кГц и построены графики, сведенные в таблицу 3.5.

В указанной таблице обозначены сплошными линиями 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.левой вертикальной линией отображено время двойного пробега отраженной от дефекта акустической волны, характеризующей глубину залегания дефекта, средней линией – длительность импульса возбуждения, правой линией - длительности отклика.

Таблица 3.5 - Фазовые характеристики разностных сигналов

 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция 16	 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция 0	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция 8
 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция 17	 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция 1	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция 9
 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция 18	 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция 2	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция 10
 Глубина залегания дефекта 25 мм, позиция 19	 Глубина залегания дефекта 40 мм, позиция 3	 Глубина залегания дефекта 60 мм, позиция 11



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 (кроме позиции 20), 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 точках 8, 9, 10, 12, 15. В точках 11, 13 на фоне монотонного убывания имеются локальные перегибы. И, наконец, в позиции 14 нельзя однозначно определить глубину залегания дефекта.

В некоторых точках кривые фазовых характеристик в области глубины залегания дефекта 60 мм имеют характерные особенности, позволяющие оценить глубину залегания.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о высокой эффективности использования разностного метода оценки глубины залегания дефектов по фазовым характеристикам.

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана одномерная математическая модель корреляционного анализа для оценки возможности его использования по определению глубины залегания макродефекта

2. Определены оптимальные размеры скользящего окна.
3. По корреляционным характеристикам откликов, зарегистрированных в окрестностях искусственных макродефектов, сделан вывод о принципиальной возможности применения метода корреляционного анализа для определения глубины залегания макродефектов при одностороннем доступе с использованием метода механоэлектрических преобразований.
4. Разработана одномерная математическая модель использования фазового метода при аналитическом представлении сигнала отклика для оценки глубины залегания макродефекта.
5. По фазовым характеристикам аналитического представления реальных временных откликов с делан вывод о принципиальной возможности давать оценку глубины залегания дефектов.
6. С учетом высокой детерминированности откликов был разработан разностный подход, существенно увеличивающий чувствительность фазового метода, а, следовательно, и надежность определения глубин залегания контролируемых макродефектов.

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕТОДА МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

4.1. Математическая модель формирования электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении образца

В отличие от ультразвукового метода контроля, в котором преобразование акустической энергии возбуждения в электрический сигнал происходит в локализованном акустоэлектрическом преобразователе, в методе МЭП механоэлектрические преобразователи рассеяны по объекту контроля (ОК). Поэтому сигнал отклика представляет собой суперпозицию электрических откликов от всех источников МЭП.

Была разработана лучевая математическая модель формирования электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении образца, содержащего распределенные по объему источники МЭП [1].

Был рассчитан полный ток смещения I через пластину приемника площадью S_r со всей поверхности S_s одного источника МЭП:

$$I = \frac{Q}{S_s} \cdot \iint_{S_s, S_r} \left\{ \frac{dh}{dt} \cdot \left[\frac{1}{r^3} \cdot \left(\frac{3 \cdot H^2}{r^2} - 1 \right) \right] - \frac{dH}{dt} \cdot \left[\frac{3 \cdot h \cdot H}{r^5} \cdot \left(\frac{5 \cdot H^2}{r^2} - 3 \right) \right] \right\} \cdot ds_s \cdot ds_r \quad (4.1)$$

где Q – связанный заряд источника МЭП; h – ширина источника МЭП H – расстояние между приемником и источником МЭП; $r(t)$ – длина радиуса-вектора от элемента источника МЭП до заданного элемента площадки приемника с учетом отражений от границ ОК; ds_r – элементарная поверхность приемника; ds_s – элемент площади источника МЭП. Индексы времени у H , h и r опущены.

Производные по h и H получены из уравнения связи продольной деформации δ с механическим нормальным напряжением σ в упругой области.

Так как механическое напряжение по пространству неоднородно, поэтому при расчете деформации между двумя точками необходимо

суммировать мгновенные элементарные деформации, в пределах которых механическое напряжение можно считать неизменным. При расчете скорости деформации на ширине источника МЭП можно считать мгновенное механическое напряжение постоянным вследствие малой величины h и выражение для вертикальной составляющей производной h по времени имеет вид:

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot \sigma_0 \cdot \frac{\frac{dF}{dt} \left(t - \frac{|\vec{r}|}{v} \right) \cdot r_{hz} \cdot h}{E^2 \cdot |\vec{r}_h|} \quad (4.2)$$

где k – коэффициент, имеющий размерность длины и равный расстоянию от центра сферической волны до области формирования напряженности σ_0 , которая равна, в первом приближении, отношению силы удара к площади соприкосновения сферической поверхности ударного устройства с образцом; $\vec{r}$ – радиус-вектор от области формирования удара до заданной точки с учетом отражений от границ ОК; $|\vec{r}_h|$ – модуль радиуса-вектора из точки удара в заданную точку источника МЭП, r_{hz} – проекция указанного радиуса-вектора на вертикальную ось; $F(t-r/v)$ – уравнение волны возбуждения; v – скорость звука в ОК.

При расчете выражения для вертикальной составляющей производной по H необходимо учитывать неоднородность механического напряжения, поэтому оно имеет вид:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{k \cdot \sigma_0}{E} \cdot \int_0^H \frac{\frac{dF}{dt} \left(t - \frac{|\vec{r}_z|}{v} \right) \cdot r_{zz}}{|\vec{r}_z|^2} \cdot dz \quad (4.3)$$

где r_{zz} – вертикальная составляющая $\vec{r}_z$, $|\vec{r}_z|$ – модуль радиуса-вектора от точки удара до точки заданной линии, соединяющей точку на источнике МЭП с точкой на пластине приемника. Вдоль этой линии вычисляется вертикальная составляющая вектора индукции.

Как видно из выражения (4.1) для тока смещения, сигнал отклика каждого СП состоит из двух составляющих. Одна составляющая связана с изменением во времени ширины источника МЭП, (назовем ее составляющей h); другая составляющая – с изменением расстояния между элементами поверхности источника МЭП и приемника сигнала (назовем ее составляющей H). Из этого выражения следует, что каждая из этих составляющих может менять свой знак при определенных углах между вертикальной осью и направлением радиуса-вектора от элемента ДЭС к элементу поверхности приемника. Поэтому общий сигнал отклика СП может быть как результат либо арифметического суммирования двух составляющих, либо вычитания. Более того, в зависимости от размеров и положения поверхностей ДЭС и приемника мы можем получить общий сигнал как сумму элементарных откликов, где не все составляющие имеют одинаковый знак.

В целом, на описанной математической модели показано, что при равномерном распределении источников МЭП по образцу наибольший вклад электрический отклик дают те источники, которые расположены вблизи приемника сигнала. Тем не менее, при определенных условиях распределения источников МЭП электрический отклик, который можно в данном случае назвать паразитным, начинает формироваться практически без задержки в момент возбуждения образца. После достижения акустической волной поверхности дефекта к уже имеющемуся отклику начинает примешиваться отклик отраженной от макродефекта волны. С течением времени, влияние на отклик начинают оказывать акустические волны, отраженные от границ образца.

4.2 Двумерная математическая модель

Экспериментальные исследования показали, что форма откликов зависит от геометрических размеров источника возбуждения приемника, а также от размеров поверхности макродефекта.

Для получения численных оценок изменения (растягивания) формы сигналов отклика в зависимости от геометрических размеров поверхностей источника возбуждения, макродефекта и приемника сигнала была разработана двумерная математическая модель.

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. Частотно-зависимым затуханием акустической волны возбуждения.
3. Дифракционными явлениями 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.

Особенностью сигнала отклика с использованием метода МЭП при системе одностороннего доступа является то, что в момент возбуждения в измерительном тракте возникает электрический сигнал, повторяющий форму акустического сигнала возбуждения. По этой причине составляющая отклика, обусловленная отражением акустической волны возбуждения от поверхности макродефекта, маскируется начальным сигналом.

Непосредственное выделение отраженного сигнала возможно при том условии, что длительность импульса возбуждения меньше времени его двойного пробега от источника возбуждения до поверхности макровключения, т. е. реализуется принцип радара (сонара).

При скорости звука, например, в бетоне 3200 м/с длительность радиоимпульса при глубине залегания дефекта 20 мм не должна превышать 10 мкс, а при глубине 60 мм – 32 мкс.

При таких условиях необходимо решать проблему выделения полезного сигнала из шума в связи с тем, что с уменьшением длительности радиоимпульса возбуждения расширяется его спектр. Это, в свою очередь, затрудняет идентификацию формы отраженного сигнала.

Поэтому был выбран другой подход, заключающийся в том, что длительность радиоимпульса возбуждения выбиралась больше времени

двойного пробега акустической волны от источника до поверхности контролируемого макродефекта. При этом возникает необходимость использования таких методов контроля, которые позволяют выделять относительно малый уровень отраженного сигнала отклика из акустического сигнала возбуждения.

В модели используется распространение акустической волны по законам геометрической акустики.

Рассмотрим схематически систему: источник сигнала, приемник сигнала и дефект в двумерном приближении, отображенную на рис. 4.1.

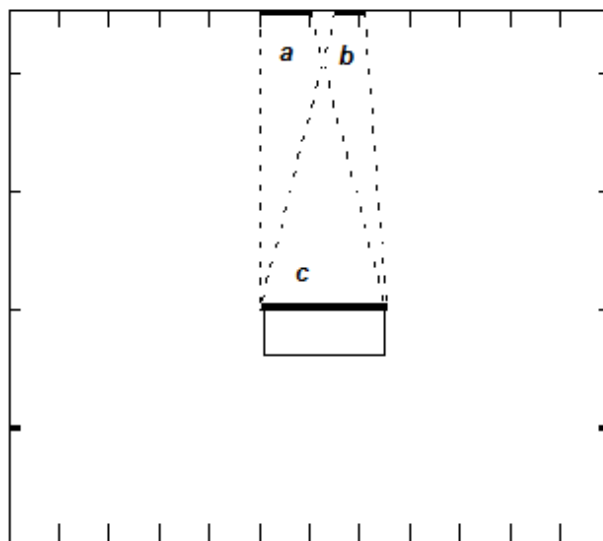


Рисунок – 4.1. Схема распространения потока акустических лучей возбуждения к дефекту и отражение части потока в область приемника сигнала. *a* – излучатель акустической волны; *b* – приемник сигнала отклика; *c* – дефект.

Здесь *a* – источник возбуждения; *b* – приемник сигнала; *c* – макродефект.

Пунктирными линиями обозначены границы лучей, участвующих в формировании отклика.

В модели заложены реальные размеры излучателя, приемника, поверхности макродефектов в виде цилиндров, а также координаты их взаимного расположения.

Линейная поверхность излучателя - 10 мм, приемника – 6 мм.

На рис. 4.2 показано положение падающего и отраженного луча акустической волны возбуждения в некоторый момент времени.

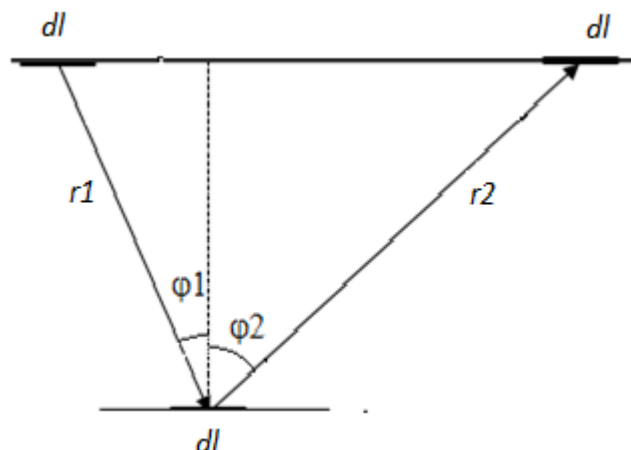


Рисунок 4.2 – Падающий и отраженный лучи

dl – элемент поверхности, на который падает и отражается луч акустической волны);

$r1$ – расстояние от элемента поверхности излучателя до элемента поверхности дефекта;

$r2$ – расстояние от элемента поверхности дефекта до элемента поверхности приемника;

$\varphi1$ – угол, под которым луч $r1$ падает на поверхность дефекта;

$\varphi2$ – угол, под которым луч $r2$ отражается от поверхности дефекта;

В модели используется распространение акустической волны по законам геометрической акустики.

Поверхности излучателя, приемника и дефекта разбиваются на площадки с линейным размером $\delta l = \delta t \cdot v$, где v – скорость звука в образце бетона (3200 м/сек); δt – период дискретизации (0.1 мкс).

Предполагается, что источник сигнала синфазно излучает акустическую волну возбуждения из каждого элемента поверхности излучателя.

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:

$$k = \frac{k_0}{r} \cdot \cos(\varphi) \quad (4.4)$$

Или

$$k = \frac{k_0}{r^2} \cdot |x_1 - x_2| \quad (4.5)$$

где k_0 – коэффициент связи, x_1 – горизонтальная координата начала луча r ; x_2 – горизонтальная координата конца луча r .

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.

На рис. 4.3 показан листинг программы, выполненный в среде Mathcad, позволяющий производить расчет импульсных характеристик откликов при сканировании над дефектами с заданными глубинами залегания.

```

 $s(h, d) :=$ 
 $u_{Nu} \leftarrow 0$ 
for  $x \in 0..nx$ 
  for  $y \in 0..ny$ 
    for  $z \in 0..nz$ 
       $r2 \leftarrow \sqrt{h^2 + [z0 + (z - y) \cdot dl - y0(d)]^2}$ 
       $r1 \leftarrow \sqrt{h^2 + [z0 + (z - x) \cdot dl - x0(d)]^2}$ 
       $r \leftarrow r1 + r2$ 
       $t \leftarrow \text{round}(r \cdot v^{-1})$ 
       $k \leftarrow \frac{h}{r1 \cdot r2}$ 
       $u_t \leftarrow u_t + k^2$ 
 $u$ 

```

Рисунок 4.3 – Листинг программы расчета импульсных характеристик при моделировании сканирования системы излучатель – приемник вдоль макродефекта.

$s(h, d)$ – функция расчета импульсной характеристики; h – глубина залегания дефекта; d – горизонтальная координата; u_{Nu} – начальный массив расчетных данных; Nu – длина массива данных; nx – количество площадок по длине излучателя; ny – количество площадок по длине приемника; nz – количество площадок по длине дефекта; $r1, r2$ – длины падающих на дефект и отраженных от него лучей соответственно; v – скорость звука в образце; $z0$ – начальная координата дефекта; t – дискрет времени; k – коэффициент затухания сигнала.

Программа позволяет производить расчеты импульсных характеристик откликов при смещении системы источник - приемник относительно дефекта, чем моделируется система сканирования по образцу.

В соответствии с предложенной моделью были рассчитаны импульсные характеристики $\text{imp}(t)$ для глубин залегания дефектов 25 мм, 40, мм и 60 мм, отображенные на рис. 4.4.

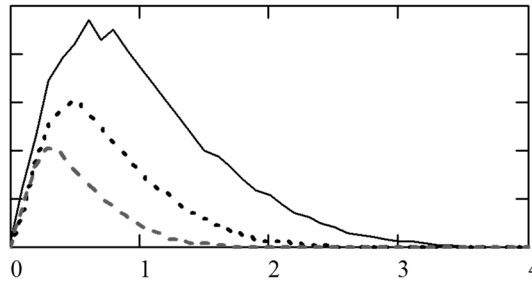
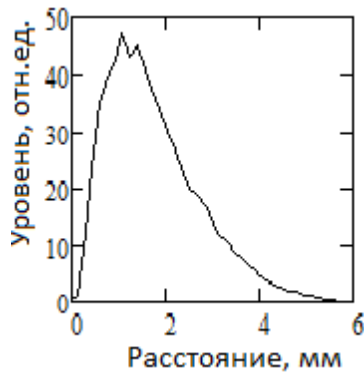


Рисунок 4.4 – Импульсные характеристики откликов на глубине залегания дефектов 25 мм (сплошная линия), 40 мм (точки), 60 мм (пунктирная линия).

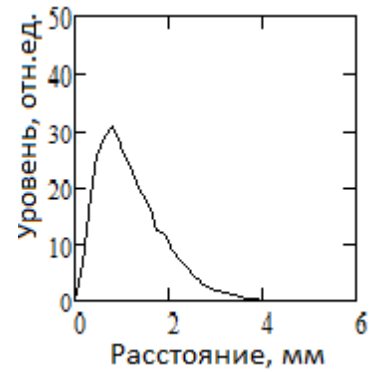
Как следует из рисунка, длительности импульсных характеристик уменьшаются с ростом глубины залегания дефекта

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).

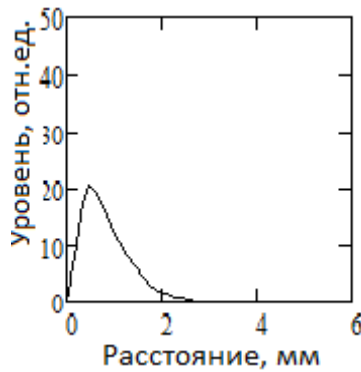
На рисунке 4.5 показаны импульсные характеристики откликов при глубине дефекта (25, 40, 60) мм и при отражении от дна образца в условиях, когда система датчиков находится над соответствующим дефектом. По оси абсцисс отложены относительные расстояния, которые пробегают акустические лучи.



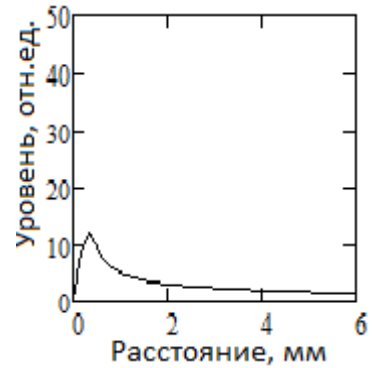
Глубина залегания дефекта 25 мм



Глубина залегания дефекта 40 мм



Глубина залегания дефекта 60 мм

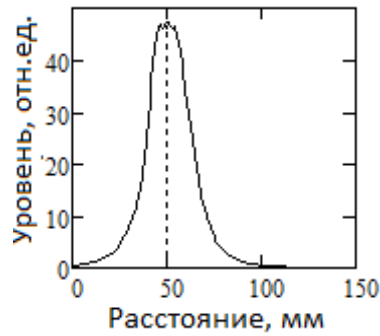


Отражение от дна образца

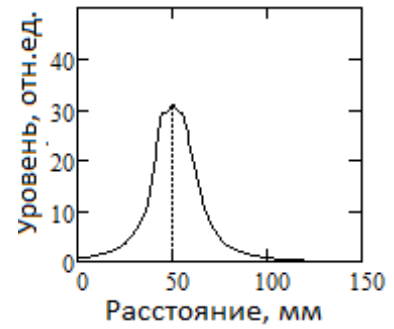
Рисунок 4.5 – Импульсные характеристики откликов при расположении системы датчиков сдвинутых относительно соответствующих дефектов на 10 мм.

При смещении узла возбуждения - приемника относительно дефекта происходит убывание сигнала отклика, а также происходит расширение импульсной характеристики. Диапазон расстояний составляет для глубин (25, 40 и 60) мм (12, 8, 6) мм соответственно.

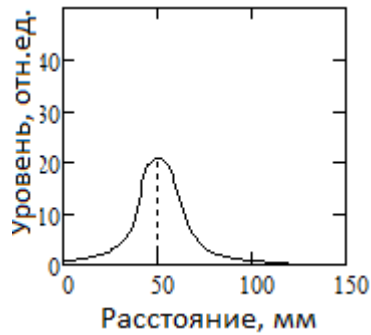
На рис.4.6 показаны расчеты максимальных уровней импульсной характеристики как функции смещения БВиС относительно дефекта.



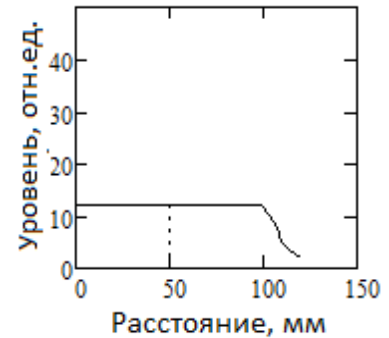
Глубина залегания 25 мм



Глубина залегания 40 мм



Глубина залегания 60 мм



Отражение от дна образца

Рисунок 4.6 – Максимумы уровней импульсных характеристик при смещении системы излучатель – приемник относительно соответствующей глубины залегания дефекта. Вертикальная пунктирная линия соответствует положению БВиС над дефектом.

Как видно из рисунка максимум отклика при отражении акустической волны возбуждения от дна практически не зависит от смещения БВиС относительно дефекта.

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

В настоящей модели в качестве возбуждающих импульсов использовались радиоимпульсы (100, 300, 600 кГц) длительностью в 1 мс.

На графиках импульсных характеристик по оси ординат отложены интенсивности. Поэтому для получения отклика $res(t)$ при воздействии на образец акустического импульса заданной формы, необходимо произвести

операцию свертки его временной зависимости с соответствующей импульсной характеристикой:

$$res(t) = \sum_{\tau=0}^t imp(\tau) \cdot u(t - \tau) \quad (4.6)$$

где $imp(t)$ –импульсная характеристика; $u(t)$ – временная зависимость импульса возбуждения.

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

На рис. 4.7. 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).

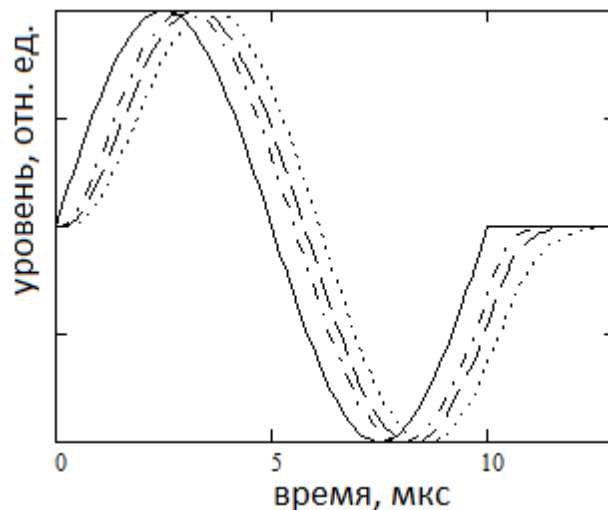


Рисунок 4.7 – Приведенные отклики при возбуждении образца прямоугольным радиоимпульсом с частотой 100 кГц длительностью в 1 период в зонах дефектов глубиной 25мм (точки), 40 мм (пунктирная линия), 60 мм (штрих-пунктирная линия) и форма импульса возбуждения (сплошная линия).

Как следует из рисунка, имеет место возрастание длительности отклика с уменьшением глубины залегания дефекта.

На рис. 4.8, 4.9 показаны приведенные отклики для импульсов с максимумами спектральных характеристик в точках 300 кГц и 600 кГц.

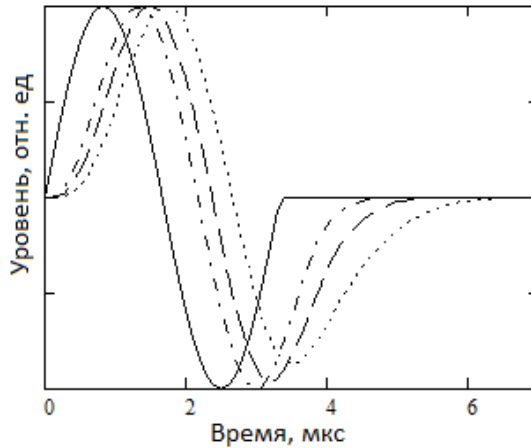


Рисунок 4.8 – Приведенные отклики при возбуждении образца прямоугольным радиоимпульсом с частотой 300 кГц длительностью в 1 период в зонах дефектов глубиной 25мм (точки), 40 мм (пунктирная линия), 60 мм (штрих-пунктирная линия) и форма импульса возбуждения (сплошная линия).

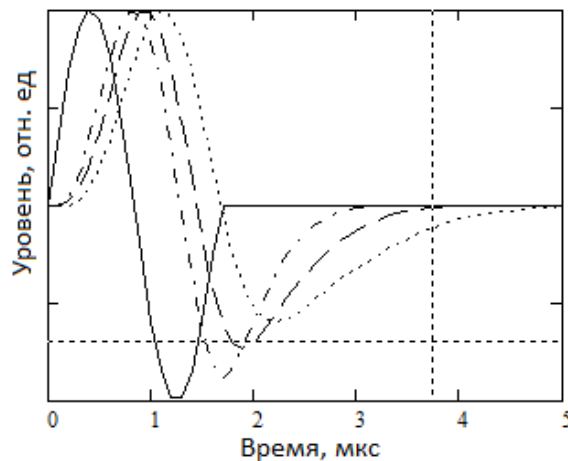


Рисунок 4.9 – Приведенные отклики при возбуждении образца прямоугольным радиоимпульсом с частотой 600 кГц длительностью в 1 период в зонах дефектов глубиной 25мм (точки), 40 мм (пунктирная линия), 60 мм (штрих-пунктирная линия) и форма импульса возбуждения (сплошная линия).

Из рисунков видно, что с ростом частоты длительности откликов увеличиваются.

Как видно из всех рисунков 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 рис. 4.10 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.

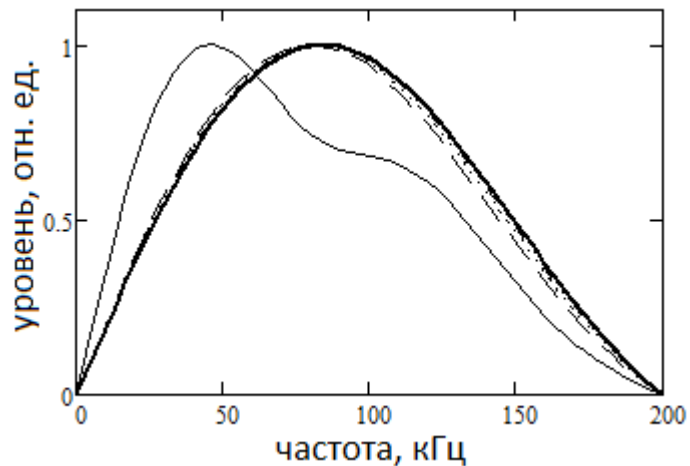


Рисунок 4.10 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрихпунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 100 кГц.

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 4.11 и 4.12 показаны АЧХ откликов и импульса возбуждения для тех же глубин для частот 300кГц и 600 кГц.

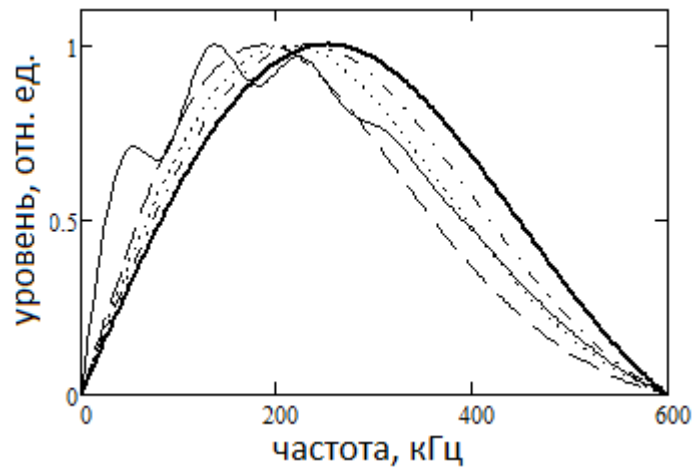


Рисунок 4.11 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрих-пунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 300 кГц.

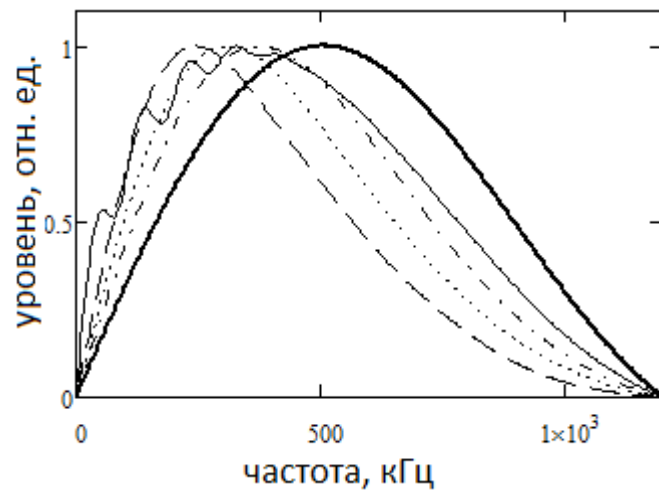


Рисунок 4.12 – Амплитудно-частотные характеристики откликов при отражении от дефектов на глубинах дефектов 25 мм (пунктирная линия), 40 мм (точки), 60мм (штрих-пунктирная линия), от дна образца (тонкая сплошная линия) и импульса возбуждения (жирная сплошная линия) на частоте 600 кГц.

Из рисунка 4.11 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.

4.3. Разработка модели частотно-зависимого затухания

При возбуждении ОК импульсом заданной формы в нем начинает распространяться сферическая акустическая волна, которая, дойдя до макродефекта, отражается к приемнику сигнала отклика. 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 и вместе с тем длинноволновые сигналы не могут быть использованы для обнаружения небольших дефектов, поскольку не отражаются от них [53].

Из этого следует, что базовая частота для сигнала возбуждения должна лежать в определённом частотном диапазоне.

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

$$s(x) = \frac{s_0}{x} \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (4.7)$$

где s_0 – начальная интенсивность волн возбуждения; x – путь волны; α – коэффициент затухания. Коэффициент α на круговой частоте ω гармонического сигнала описывается выражением:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot \eta}{3 \cdot \rho \cdot v^3} \quad (4.8)$$

где η – вязкость материала; ρ – плотность материала; v – продольная скорость звука.

Как следует из формулы (4.8) 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.

В работе [90] был разработан метод оценки степени искажения формы импульса от расстояния, на которое распространяется волна. Для этого сигнал возбуждения разлагался на гармоники с использованием преобразования Фурье, рассчитывались для заданного расстояния степени затухания волны, а затем производилось суммирование полученных гармоник с учетом их фаз. Синтезированный таким образом сигнал позволял производить корреляционный анализ с реальным откликом, прошедшим то же расстояние. Метод показал свои потенциальные возможности, но его существенным недостатком является сложность реализации.

В работе [91] получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать изменение формы гауссового волнового пакета с частотно-модулированным по линейному закону высокочастотным заполнением в диссипативной среде. Решение задачи ограничивается использованием гауссовой огибающей использовать табличные интегралы для решения поставленной задачи.

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 дескритизации показана формулой 3.

$$f_{i+1}(t) = f_i(t) - \frac{f_i(t)}{dt} \cdot k \quad (4.9)$$

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 рис.4.13 показана временная реализация усредненных откликов.

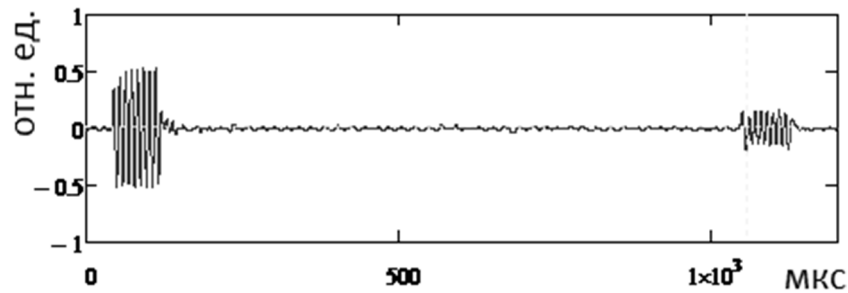


Рисунок 4.13 – Временная реализация двух прямоугольных радиоимпульсов одинаковой амплитуды частотой 105 кГц сдвинутых относительно друг друга на 1 мс.

Больший 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 4.14 показаны временные реализации откликов от двух радиоимпульсов, сдвинутых один относительно другого также на 1 мс.

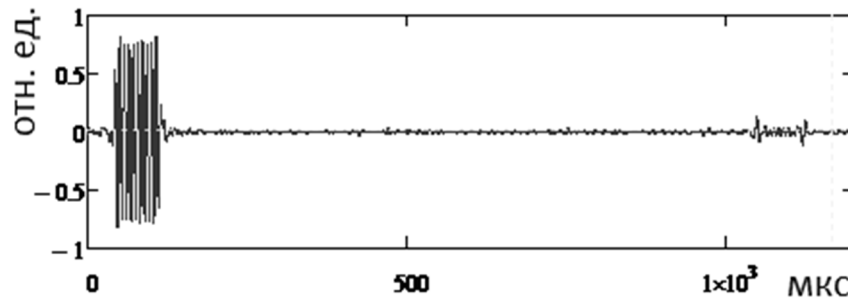


Рисунок 4.14 – Временная реализация двух прямоугольных радиоимпульсов одинаковой амплитуды частотой 140 кГц сдвинутых относительно друг друга на 1 мс.

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.

Было произведено моделирование искажения радиоимпульсов за счет частотно-зависимого затухания. Для оценки степени затухания на более высоких частотах был произведен расчет с использованием предложенного алгоритма затухания на математической модели.

Суть модели заключалась в том, что был 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

$$s_j = 100 \cdot j \cdot v \quad (4.10)$$

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

Были рассчитаны затухания волн в точках s_j .

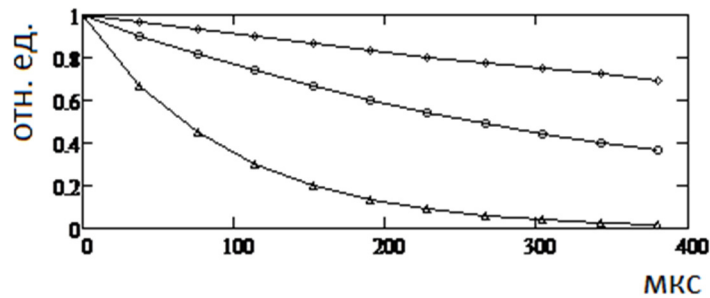


Рисунок 4.15 – Зависимость убывания уровней радиоимпульсов с расстоянием. Верхний график соответствует частоте 150 кГц, средний - 250 кГц, нижний – 500 кГц.

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

На рисунке 4.16 отображены формы сигналов откликов после прохождения указанных расстояний.

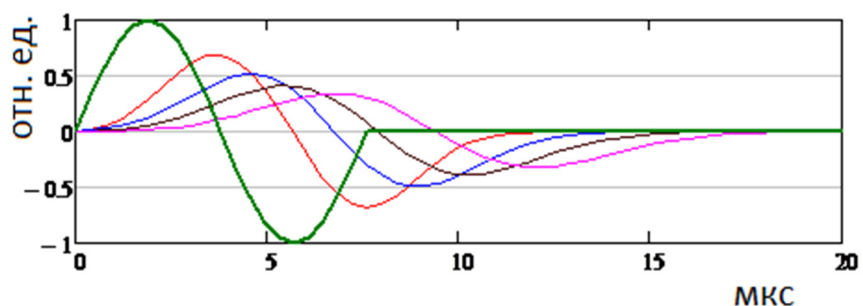


Рисунок 4.16 – Изменение формы импульсов с расстоянием. Формы сигналов при прохождении волной в форме периода гармоники частотой 500 кГц образца. Графики убывающего уровня соответствуют пути в (40, 80, 120, 240) мм.

Как видно из рисунка, происходит существенное растягивание импульса возбуждения, что существенно затрудняет использование корреляционного анализа для поиска местоположения макродефекта.

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:

$$J_{sc} = J_{exc} \cdot \frac{\omega^4 \cdot a^6}{9 \cdot v^4 \cdot r^2} \cdot (1 + 1.5 \cdot \cos \alpha)^2 \quad (4.11)$$

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

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

Таким образом, размер макродефекта может давать свой вклад деформацию отклика на импульсное возбуждение.

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

4.4 Выводы по главе 4

1. Согласно математической модели метода механоэлектрических преобразований наибольший вклад в электрический отклик дают источники МЭП, которые расположены вблизи приемника сигнала.

2. Разработана двумерная математическая модель, позволяющая рассчитывать импульсные характеристики откликов, обусловленных акустической волной возбуждения, отраженной от поверхности контролируемого макродефекта.
3. Рассчитано влияние размеров поверхностей источника возбуждения, приемника сигнала отклика, отражающей поверхности макродефекта и его глубины залегания на степень деформации формы сигнала отклика.
4. Разработана модель частотно-зависимого затухания акустической волны по временным характеристикам отклика, подтвержденная результатами эксперимента.
5. На качественном уровне показано влияние на форму отклика дифракционных процессов, связанных с соотношением линейных размеров отражающей поверхности контролируемого макродефекта и длин волн спектральных составляющих импульса возбуждения.

ВЫВОДЫ

Для решения задачи определения возможности использования метода механоэлектрических преобразований для определения местоположения макродефектов в композитных диэлектрических материалах были рассмотрены особенности электрических откликов при импульсном возбуждении объекта:

1. Источником электрического сигнала отклика является суперпозиция распределенных по объему образца источников механоэлектрических преобразований.
2. Осуществляется бесконтактный прием сигнала отклика, который формируется за счет источников МЭП, расположенных в непосредственной близости от емкостного приемника сигнала.
3. Паразитный электрический сигнал возникает в момент возбуждения, повторяет форму акустического возбуждения образца и маскирует полезный сигнал, отраженный от поверхности контролируемого макродефекта.
4. Имеется возможность при использовании исследовательской установки, основанной на методе МЭП, получить высокое отношение сигнал/шум за счет многократного возбуждения образца при неизменной геометрии эксперимента.

С учетом указанных особенностей рассмотрены 2 подхода, позволяющие выделить полезную составляющую сигнала с использованием аналитического представления временной характеристики отклика для решения задачи оценки глубины залегания макродефекта: метод корреляционных характеристик с использованием скользящего окна и фазовый метод.

В результате выполненной работы 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.

В дальнейшем предполагается использовать полученные расчетные данные для преобразования паразитных составляющих отклика к форме, наиболее соответствующей форме отраженного сигнала, что позволит повысить надежность определения глубины макродефектов с использованием корреляционного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sokolow S. J. Zur Frage der Fortpflanzung ultra-akustischer Schwingungen in verschiedenen Korpern, «Elektrische Nachrichten-Technik». — 1929. — v. 11. — p. 454-461.
2. Зацепин А. Ф. Акустический контроль : учебное пособие / А. Ф. Зацепин ; под ред. В. Е. Щербинина. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 211 с.
3. Гондаревский В.П. Способ ультразвукового контроля изделий: пат. SU 1758541 A1 СССР: Гондаревский В.П. заявитель Московский машиностроительный завод им. А. И. Микояна заявл. 05.02.1990; опубл. 30.08.1992. Бюл.№32 – 5с:ил.
4. Никитин В. Г. Первичные преобразователи. Ультразвуковые, пьезоэлектрические преобразователи: учебное пособие/ В.Г. Никитин — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева монография Самара — с.150.
5. Грешников В.А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий/В.А. Грешников, Ю.В. Дробот// М.: Изд-во стандартов, — 1976. — 272 с.
6. Поллок А. Physical Acoustics Corporation Металлы (METALS HANDBOOK), 9-ое издание, —ASM International — 1989 — т. 17с. 278-294,.
7. Зубова Е.М. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия / Е.М. Зубова, Д.С. Лобанов, Е.М. Струнгарь, В.Э. Вильдеман, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2019. — № 1. — С. 38–48.
8. Беркович В.Н. Восстановление амплитуд излучения дефекта по сигналам акустической эмиссии на свободной границе массивного тела / В.Н. Беркович, С.И. Буйло // Дефектоскопия — 2019 — №4 — с. 15-20.

9. Буйло С.И. Физико-механические, химические и статистические аспекты акустической эмиссии / С.И. Буйло // Известия Алтайского государственного университета. — 2019. — № 1 (105). — С. 11-21.
10. Бриганте М. Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области экспериментальных исследований. / М. Бриганте, М.А. Сумбатян //Дефектоскопия. — 2013. — № 2. — С. 52-67.
11. Воллбрандт М. Генерирование электронов высоких энергий при разрушении твердых тел./ М. Воллбрандт, Ю.А. Хрусталева, Э.И. Линке и др. // ДАН СССР. — 1975. — Т. 225, № 2. — С. 342—344.
12. Корнфельд М.Н. Электризация ионного кристалла при расщеплении./ М.Н. Корнфельд // ФТТ. — 1974. — Т. 16, вып. 11. — С. 3385—3387.
13. Кротова Н.А. Исследование электронной эмиссии при раскалывании твердых тел в вакууме / Н.А. Кротова, В.В. Карасев // Докл. АН СССР. — 1953. — Т. 92, №3, —С. 607—610.
14. Перельман М.Е. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков / М.Е. Перельман, Н.Г. Хатиашвили // Докл. АН СССР. —1981. — Т. 256, № 4. — С. 824—826
15. Воробьев А.А. Исследование радиоизлучения, вызванного нагреванием слюды в вакууме / А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, В.Н. Сальников // Тез. докл. 4 Всесоюзного симпоз. по механоэмиссии и механохимии твердых тел. - М.: Наука, —1973 — С. 72-73
16. Воробьев А.А. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физикохимических процессах в них / А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, В.Н. Сальников //ДАН СССР. — 1975. — Т. 220 №1. — С. 82-85.
17. Воробьев А.А. Наблюдения радиоимпульсов при нагревании кристаллов и минералов в вакууме / А.А. Воробьев, В.Н. Сальников, М.В. Коровкин // Изв. ВУЗов. Сер. Физика. — 1975. — №7. — С. 59-64.

18. Молоцкий М.И. Дислокационный механизм электризации ионных кристаллов при расщеплении / М.И. Молоцкий // ФТТ. — 1986. — Т. 18, вып. 6. — С. 1763-1764.
19. Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях/ М.Е. Перельман, Н.Г. Хатиашвили // Докл. АН СССР. — 1983. — Т. 271, № 1. — С. 80—83.
20. Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород: монография / А.А. Карабутов, В.А. Марков, Е.Б. Черепецкая, В.Л. Шкуратник — М.: Изд. Моск. гос. горного ун-та, 2008. — 175 с.
21. Гершензоп Н.И. Электромагнитное излучение вершины трещины при разрушении ионных кристаллов/ Н.И. Гершензоп, Д.О. Зилпилшани, П.В. Манджгаладзе и др. //Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 228, № 1. — С. 75—78.
22. Гохберг М.Б. Об автоматизации поиска оперативных электромагнитных предвестников землетрясений. / М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, Е.А. Герасимович, И.В. Матвеев // — Автоматизация исследований геомагнитных пульсаций. — М., 1985. — С.84-91.
23. Панасюк В.В. Теоретическое исследование электромагнитного излучения при развитии круговой трещины в диэлектрике / В.В. Панасюк, Б.И. Колодий // Физико-химическая механика материалов. — 1983. — №5. — С. 72—75.
24. Корнейчиков В.П. Исследование механизма формирования электромагнитного излучения горных пород в связи с прогнозированием землетрясений: Автореферат . дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.12/ В.П. Корнейчиков— М., 1984. — 17 с.
25. Масов Ш.Р. Электромагнитное поле системы трещин хрупкого разрушения / Ш.Р. Масов, С.Б. Нурмагамбетов // Изв. АН СССР. Физика земли. — 1988, — №3 —С. 107-111
26. Электромагнитные предвестники землетрясений. Под ред. М.А. Садовского. — М.: Наука, 1982. — 89 с.

27. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений: сборник статей/ под ред. М.Б. Гохберга / Ин-т физики Земли АН СССР. — М., 1988. — 243 с.
28. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений - М.: Наука, 1993. — 314 с.
29. Гольд Р.М. Оценка НДС пород а Таштагольском месторождении и тоннелях БАМ экспрессным электро-магнитным методом / Р.М. Гольд, Л.В. Яворович, Ш.Р. Мастов и др. // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: Сб. науч. тр. I Ин-т горного дела СО АН СССР. - Новосибирск, 1985. — С. 85—90.
30. Колмаков В.В. Разработка метода и аппаратуры контроля трещинообразования в горных породах по параметрам естественного электромагнитного излучения: Автореф. дис, канд. тех. наук. — Кемерово, 1989— 18 с.
31. Головин Ю.И. Электромагнитное излучение деформированных щелочно-галогидных кристаллов / Ю.И. Головин, Т.П. Дьячек, В.И. Усков, А.А. Шибкое // II ФТТ. — 1985. — Т. 27, вып. 2. — С. 555-557.
32. Шведов И.М. Разработка способа прогнозирования выбросоопасности карналлитовых пластов по их электромагнитному излучению: Автореф. дис. канд. тех. наук. — М., 1986. — 14 с.
33. Гончаров А.И. Акустическая эмиссия и электромагнитное излучение при одноосном сжатии / А.И. Гончаров, В.П. Корявое, В.И. Кузнецов и др. // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 255, № 4. — С. 821-824.
34. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. / Г.Е. Яковицкая // Новосибирск: Параллель, — 2008. — 315 с.
35. Воробьев, А.А. О возможности возникновения электрических разрядов в недрах Земли / А.А. Воробьев // Геология и геофизика. — 1970. — №12. — С. 3-14.

36. Воробьев, А.А. Наблюдения радиоволн и аномальные изменения электропроводимости при нагревании образцов горных пород и минералов / А.А. Воробьев, В.Н. Сальников // ФТПРПИ. — 1976. — N 5. — С.3-15.
37. Воробьев, А.А. Наблюдение электромагнитных и электрических явлений в образцах горных пород при нагревании/ А.А. Воробьев, А.А. Беспалько В.Г. Качковский, В.Н. Сальников// Сб. Физ. свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. — 1974. — С.115-118.
38. Воробьев, А.А. О природе электромагнитных волн, излучаемых горными породами при их нагружении / А.А. Воробьев, В.Ф. Ширяев, Л.А. Защинский, В.Д. Евсеев //Проблемы нефти и газа Тюмени. — 1974. — Вып.4. — С. 77-80.
39. Гольд, Р.М. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подвергнутых механическому нагружению/ Р.М. Гольд, Г.П. Марков, П.Г. Могила, М.А. Самохвалов //Известия АН СССР. Физика Земли. — 1975, № 7. — С. 109-111.
40. Хатиашвили, Н.Г. Электромагнитное излучение ионных кристаллов, стимулированных акустической волной/ Н.Г. Хатиашвили //Письма в ЖТФ. — 1981. — Т.7, в. 18. — С. 1128-1132.
41. Хатиашвили, Н.Г. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы/ Н.Г. Хатиашвили, М.Е. Перельман //ДАН. — 1982. — Т.263, №4. — С. 839-842.
42. Воробьев, А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах/ А.А. Воробьев. — Томск: Изд-во ТГУ, 1980. — 211 с.
43. Гольд, Р.М. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подвергнутых механическому нагружению/ Р.М. Гольд, Г.П. Марков, П.Г. Могила, М.А. Самохвалов //Известия АН СССР. Физика Земли. —1975, № 7. — С. 109-111.
44. Гохберг М.Б. Сейсмoeлектромагнитные явления. / М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, О.А. Похотелов // — М.: Наука, 1988. — 175 с.

45. Хатиашвили Н.Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галогидных кристаллах и горных породах / Н.Г. Хатиашвили // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1984. — № 9. — С. 13—19.
46. Журков С.Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 259, № 6. — С. 1350—1353.
47. Гор А.Ю. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов / А.Ю. Гор, В.С. Куксенко, Н.Г. Томилин, Д.И. Фролов // ФТПРПИ. — 1989. — № 3. — С. 54—60.
48. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Наука, 1975. — 255 с.
49. Фурса Т.В. Исследование взаимосвязи структурных характеристик слоистых композиционных материалов с параметрами электрического отклика на импульсное механическое возбуждение./ Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, К.Ю. Осипов, В.А. Зацепин // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. № 7. — С. 10-13.
50. Суржиков А.П. Математическая модель электрического отклика на акустическое возбуждение композиционных материалов/ А.П. Суржиков, Т.В. Фурса, Н.Н. Хорсов // Известия Томского Политехнического Университета, — 2005. — т. 308 -№ 7— с. 6-9.
51. Хорсов Н.Н. Математическая модель регистрации отклика при акустоэлектрическом преобразовании в образце с включением в виде двойного электрического слоя при точечном ударном возбуждении / Н.Н. Хорсов // Известия вузов. Физика, 2007. -т. 50 -№ 2 -с. 69-77.
52. Фурса Т.Н. Математическая модель электрического отклика на упругое ударное возбуждение гетерогенных диэлектрических материалов, содержащих пьезоэлектрические включения / Т.Н. Фурса, Б.А. Люкшин, Г.Е. Уцын // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2011. — Т. 54. № 10 (2). — С. 192-197.

53. Хорсов П.Н. Мультисенсорная аппаратура контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния гетерогенных диэлектрических структур: монография / А. П. Суржиков [и др.]; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2014. — 92 с.

54. Беспалько А.А. Механоэлектрические преобразования в кварце и кварцсодержащих горных породах в процессе акустического воздействия./ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. —2007. — № 5. — С. 22-27.

55. С.А. Айвзян, В.С. Мхитарян Теория вероятностей и прикладная статистика. Т. 1. / Прикладная статистика. Основы эконометрики: Учебник для вузов: В 2 т. 2-е изд., испр. — М: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. — 656 стр.

56. Суржиков В.П. Влияние объемной дефектности на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах / В.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, П.Н. Хорсов // Дефектоскопия. — 2012 — №. 2 — С. 15-20.

57. Суржиков В.П. Влияние локальной поверхностной дефектности на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах / В.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов // Контроль. Диагностика. — 2011, Вып. специальный — С. 132-134.

58. Илларионов А.А. К оценке уровня реверберационной помехи при частично-когерентной обработке эхо-сигналов/ А.А. Илларионов, С.В. Козловский, А.Б. Корякин, С.Е. Щерба // Известия ЮФУ. Технические науки. —2015 — № 12 (173), — С. 25–35.

59. Раевский М.А. Обобщение теории низкочастотной поверхностной реверберации для коротких импульсных акустических сигналов в океане / М.А. Раевский, А.И. Хилько // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 2008, —Т. 51, № 4, — С. 295–303.

60. Давыдов В.С. Распознавание гидролокационных сигналов от морских подводных объектов сложной формы, перемещающихся в скрытных режимах, на фоне реверберационных помех/ В.С. Давыдов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2011, — № 5, — С. 34–43.

61. Khorsov, P. The Application of Reverberation in Method of Mechanoelectrical Transformations for Estimation of Stress-Strain State in Solid Dielectrical Matter./ P. Khorsov , R. Laas, A.P. Surzhikov // Material Science Forum— 2019 — 970 — 47–54.

62. Давыдов В.С. Распознавание гидролокационных сигналов от морских подводных объектов сложной формы, перемещающихся в скрытных режимах, на фоне реверберационных помех / В.С. Давыдов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2011, — № 5, — С. 34–43.

63. Усик В.В., Мягкий И.Г. Автоматизированный акустический расчет помещений зрительных залов с использованием статистической теории / В.В. Усик, И.Г. Мягкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2010, — Т. 3, № 11 (45), — С. 22–26.

64. Суржигов В.П. Влияние одноосной нагрузки на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах / В.П. Суржигов, Н.Н. Хорсов // Дефектоскопия. — 2011 — №. 10 — С. 50-54

65. Khorsov P.N. Development the Adjusted Mathematical Model of Responses in the Nondestructive Testing Defectiveness Method Based on the Mechanoelectrical Transformations / P.N. Khorsov, V.P. Surzhikov and A.A. Demikhova.// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017, —Vol. 168, — 012106.

66. Аббасов, И. Б. Рассеяние нелинейно взаимодействующих акустических волн: сфера, цилиндр, сфероид / И. Б. Аббасов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 160 с.

67. Карташев В.Г. Применение синхронного детектирования при ультразвуковой толщинометрии бетонных изделий с неоднородной

структурой/ В.Г. Карташев, В.К. Качанов, И. В. Соколов, Е.В. Шалимова, Р.В. Концов.// Дефектоскопия. — 2015. — № 8. —С. 34-46.

68. Аббасов И.Б. – Трехмерное моделирование диаграмм рассеяния взаимодействующих акустических волн на вытянутом сфероиде/ И.Б. Аббасов // -Известия вузов. Северо-кавказский регион. Естественные науки. — 2004. — № 3 (127). —С. 27-29.

69. Карпов И.Г. Основы радиоэлектроники и связи. Ч.I. Основы оптимального радиоприёма/ И.Г. Карпов, А.Н. Грибков // Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 80 с.

70. Осипов К.Ю. Разработка методов неразрушающего контроля строительных материалов, основанных на явлении механоэлектрических преобразований: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13/ Осипов Константин Юрьевич — Томск, 2007 — 167 с.

71. Ковалев А.В. Поисковые технические средства на основе методов интроскопии. Акустические поисковые системы [Электронный ресурс]/ А.В. Ковалев// Журнал «Специальная Техника» — 2000 — Режим доступа: http://www.vrsystems.ru/stati/poiskovie_texnicheskie_sredstva_na_osnove_metod_ov_introskopii_akusticheskie_poiskovie_sistemi.htm

72. Бархатов В.А. – Применение оконных функций в задачах распознавания образов ультразвуковых сигналов/ В.А. Бархатов // Дефектоскопия. — 2010. — № 10. — С. 3-10.

73. Бархатов В.А. – Распознавание образов класса, заданного параметрически/ В.А. Бархатов // Дефектоскопия. — 2009. — № 2. — С. 3-17.

74. Козлов А.В. Развитие и современное состояние методов неразрушающего контроля и акустической томографии бетона УДК 620.179.16 Акустические методы / А.В. Козлов, В.Н. Козлов // Дефектоскопия. — 2015. — № 6. — С. 3-14.

75. Качанов В.К. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых

сигналов/ В.К. Качанов, И.В. Соколов, В.В. Первушин, Д.В. Тимофеев // Дефектоскопия. — 2019. — № 6. — С. 3-10.

76. Бархатов В.А. – Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки эхосигналов. / В.А. Бархатов // Дефектоскопия. — 2004. — № 6. — С. 10.

77. Базулин Е.Г. Использование в ультразвуковом неразрушающем контроле метода двойного сканирования для повышения качества изображения дефектов/ Е.Г. Базулин // Дефектоскопия —2009/ —№2— С. 18-32.

78. Немытова О.В. Использование оценки мгновенной частоты для классификации эхосигналов от различных отражателей. /О.В. Немытова, А.Б. Ринкевич, Д.В. Петров// Дефектоскопия — 2012 —№11 — с. 46-61.

79. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии/ Е.Г. Базулин // В сборнике: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. труды XV Всероссийской конференции. — 2020. — С. 402-405.

80. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками. / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия. —2014. — № 3. — С. 12-22.

81. Бенаммар А., Улучшение разрешающей способности ультразвуковых сигналов с использованием алгоритмов разреженной деконволюции и декомпозиции на эмпирические моды./ А. Бенаммар, Ф. Чибане, // Дефектоскопия. —2020. — № 6. — С. 14-24.

82. Карабутов А. А. Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами/ А. А. Карабутов, Л. И. Кобелева, Н. Б. Подымова, Т. А. Чернышова // Электронный журнал «Техническая акустика» <http://www.ejta.org> 2008, 19

83. Гусев В. Э. Лазерная оптоакустика: учебное пособие/В.Э. Гусев, А.А. Карабутов// М.: Наука — 1991. —304 с.

84. Коновалов С.И. О возможности сокращения длительности переходного процесса в акустическом преобразователе при помощи компенсирующего электрического импульса/ С.И. Коновалов, А.Г. Кузьменко // Дефектоскопия. — 2014. — № 7. — С. 12-18.

85. Карташев В.Г. Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой. / В.Г. Карташев, В.К. Качанов, И.В. Соколов, Л.В. Воронкова, Р.В. Концов // Дефектоскопия. — 2018. — № 1. — С. 19-32.

86. Ковалев А.В. Поисковые технические средства на основе методов интроскопии. Акустические поисковые системы. [Электронный ресурс] — Журнал «Специальная Техника» — 2000 — Режим доступа: http://www.ess.ru/sites/default/files/files/articles/2000/02/2000_02_01.pdf.

87. Севалкин Д.А. Методы математического моделирования структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии/ Д.А. Севалкин // Вестник Московского энергетического института. — 2007. — № 2. — С. 109-116

88. Качанов В.К. Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов /В.К. Качанов, В.Г. Карташев, И.В. Соколов, М.В. Туркин// Дефектоскопия. —2007. —№ 9. —С. 71-87.

89. Качанов В.К., В.Г. Карташев, И.В. Соколов, Р.В. Концов, Э.И. Трунов - Ультразвуковой томограф бетонных строительных конструкций с боковым излучением сигнала / В.К. Качанов, В.Г. Карташев, И.В. Соколов, Р.В. Концов, Э.И. Трунов // Дефектоскопия. — 2020. — № 2. —С. 12-20.

90. Khorsov, P.N. Development the Adjusted Mathematical Model of Responses in the Nondestructive Testing Defectiveness Method Based on the Mechanoelectrical Transformations [Electronic resource] / P. N. Khorsov, V. P. Surzhikov, A. A. Demikhova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering . — 2017 . — Vol. 168 012106, 6 с.

91. Гаврилов А. М., А. Д. Курситыс Распространение гауссового волнового пакета с высокочастотным ЛЧМ заполнением в диссипативной среде [Электронный ресурс] / Гаврилов А. М., А. Д. Курситыс// Электронный журнал "Техническая акустика" — 2012 — №4 — Режим доступа: <http://ejta.org>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Приложение 1

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы
Лааса Романа Александровича
в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертации Лааса Романа Александровича «Разработка неразрушающего метода определения глубины залегания макродефектов в неметаллических материалах на основе механоэлектрических преобразований», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» используются в отделении «Контроль и диагностика» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности при изучении дисциплин «Основы контроля и диагностики» и «Неразрушающий контроль и диагностика» для подготовки бакалавров и магистров по направлениям 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение».

Заведующий кафедрой - руководитель
отделения (на правах кафедры)
«Контроль и диагностика»,
д.ф.-м.н., профессор

 А.П.Суржиков

Профессор отделения
«Контроль и диагностика», д.т.н.

 А.Е.Гольдштейн.

Доцент отделения
«Контроль и диагностика», к.т.н.

 Г.В.Вавилова

ПРИЛОЖЕНИЕ В



ООО «СТК»
634034, Россия, Томск. +7 3822 60-97-08
ул. Кулэва, 24, оф. 404-405 +7 3822 90-56-10

ИНН 7017261765 info@sto-tomsk.ru
КПП 701701001 sto-tomsk.ru
ОГРН 1107017006900

«УТВЕРЖДАЮ»



ООО «Системы. Технологии. Коммуникации»
Генеральный директор
А. Д. Савин
«09» марта 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Лааса Романа Александровича «Разработка неразрушающего метода определения
глубины залегания макродефектов в неметаллических материалах на основе
механоэлектрических преобразований»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы
Лааса Романа Александровича были использованы в период с 2018г. по 2020г. при
выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по
хозяйственным договорам:

1. № ГНЯ-20/11040/01315/Р/6-3 от 14.12.2020 по проекту «Газопровод внешнего транспорта газа с Новопортовского НГКМ через Обскую губу»;
2. Дополнительное соглашение № 1 от 21.12.2020 г. к Приложению № 4 от 04.11.2020 г. к Договору поставки № ДП_64025_51397_42863 от 15.08.2020 г по проекту «Обустройство Ен-Яхинского месторождения. Кусты скважин №№201, 203, 205, 222, 231»

Технический директор
ООО «Системы. Технологии. Коммуникации»

 / Д. И. Щебрюк /