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

На правах рукописи

Седнев Дмитрий Андреевич

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., доцент Демянюк Д.Г.

ТОМСК – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПЛОМБИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕПРИСУЩИХ ПРИЗНАКС МАТЕРИАЛА В ЦЕЛЯХ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯМ	ЭВ . 10
1.1 Использование систем пломбирования	. 10
1.1.1 Пассивные ПУ	. 10
1.1.2 Активные ПУ	. 15
1.2 Сухое хранение ОЯТ	. 17
1.2.1 Основные типы конструкций пеналов с ОЯТ	. 18
1.2.2 Структура герметизирующего сварного соединения	. 22
1.3 Дактилоскопическая идентификация внутреннеприсущих признаков	. 25
1.4 Устройства отбора внутреннеприсущих признаков	. 29
1.5 Выводы к главе 1	. 35
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВНУТРЕННЕПРИСУЩИХ ПРИЗНАКОВ В СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛА	. 37
2.1 Модель формирования и сравнения уникальных идентификационных признаков в системе учета и контроля	. 37
2.1.1 Обработка акустических сигналов	. 39
2.1.2 Формирование массива уникальных идентификационных признак	юв 52
2.1.3 Определение степени корреляции массива уникальных идентификационных признаков	. 59
2.2 Оптимизация распределения элементов многоэлементного преобразователя	. 67
2.3 Выводы к главе 2	. 76
ГЛАВА З МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТА	. 79
3.1 Описание контролируемых образцов	. 79
3.2 Описание измерительного тракта	. 89
3.3 Методики снятия входных данных для акустической идентификации.	. 92
3.3.1 Одноканальный контактный ручной контроль	. 92
3.3.2 Автоматизированной иммерсионный контроль с линейной ФАР	. 94
3.3.3 Контроль матричным преобразователем со спиральным распределением.	. 97

3 4 Процедура проведения ультразвуковой идентификации	102
э.ч процедура проведения ультразвуковой идентификации	102
3.5 Выводы к главе 3	106
ГЛАВА 4 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	107
4.1 Одноканальный контактный ручной контроль	107
4.2. Автоматизированный иммерсионный контроль с линейной ФАР	116
4.3 Контроль матричным преобразователем со спиральным распределе	ением
	122
4.4 Выводы к главе 4	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	144
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	145

ВВЕДЕНИЕ

Организация системы учета и контроля ядерных материалов (ЯМ) имеет важное значение на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), обусловленное потенциальной опасностью ядерного материала и его привлекательностью для хищения [1].

Национальные и международные организации прикладывают значительные усилия по разработке и совершенствованию систем и устройств индикации вмешательства [2-5]. Согласно рекомендациям ГК «Росатом» по применению систем пломбирования считается, что отсутствуют официальные данные о пломбировочных устройствах, которые невозможно подделать [6]. Международное агентство по атомной энергии включило в свой план НИОКР соответствующие проекты по созданию систем пломбирования. Основное направление работ в данной области – создание устройств с использованием устойчивых к подделке уникальных идентификационных признаков, которые могут быть однозначно измерены без нарушения целостности пломбы [7].

В настоящее время технологии неразрушающего контроля получили широкое распространение в задачах обеспечения безопасности ответственных узлов ядерной техники [8-10]. Перспективными методами в данной области считаются радиографический И ультразвуковой контроль (УЗК). Совершенствование в области аппаратной базы фазированных антенных (ΦAP) обработки решеток И развития методов сигнала на высокопроизводительных системах параллельных вычислений выводит на лидирующие позиции в производственных применениях методы УЗК [8]. Одной из традиционных сфер применения УЗК, является контроль сварных соединений высокой ответственности, в том числе в производственном процессе ЯТЦ, например при производстве пеналов для хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [11-12].

Единственным предприятием в России, разрабатывающим специализированный комплекс сухого хранения ОЯТ, является ФГУП ФЯО

«Горно-химический комбинат» (ГХК) [13]. В настоящее время ГХК расширяет площади хранилища ОЯТ для осуществления сухого хранения ОЯТ реакторов типа ВВЭР [14]. В целях обеспечения ядерной и радиационной безопасности пенал представляет собой герметичную конструкцию. Герметизация обеспечивается свариванием крышки пенала с его корпусом [15]. В ходе процесса сварки происходит стохастическое формирование структуры сварного шва, распределение и ориентацию зерен в которой невозможно дублировать в настоящее время [16]. Это позволяет сформировать уникальный идентификационный признак (УИП) c использованием результатов акустического измерения сварного соединения.

В связи с этим <u>целью настоящей работы</u> является разработка аппаратного и методического обеспечения акустического измерения структурных особенностей конструкционного материала сварного соединения для формирования уникального идентификационного признака шва.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие <u>задачи</u>:

 Разработать модель формирования УИП с использованием обработанного акустического сигнала.

2. Разработать и изготовить спиральный матричный акустический преобразователь, входящий в лабораторный измерительный комплекс для ультразвуковых исследований конструкционных материалов ядерной энергетики.

3. Провести лабораторные эксперименты по акустическому исследованию сварных соединений для формирования УИП и их корреляционного анализа с помощью разработанной модели.

4. Определить уровни корреляции УИП, полученных и обработанных различными методами корреляции на образцах, предоставленных ФГУП ФЯО ГХК, выполненных из аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель обработки акустических данных для формирования УИП.

2. Конструкция спирального матричного акустического преобразователя, позволяющая производить измерения в автоматизированном и ручном режимах при обеспечении изотропной чувствительности в области прозвучивания.

3. Результаты измерений образцов ФГУП ФЯО ГХК с помощью разработанного спирального матричного акустического преобразователя в ручном и автоматизированном режимах.

<u>Научная новизна</u> диссертационной работы заключается в том, что впервые:

 предложено использование внутреннеприсущих признаков сварного соединения в качестве УИП объекта контроля;

 предложена модель формирования УИП и их дальнейшего корреляционного сравнения и проведена экспериментальная апробация модели на примере образов сварных соединений, выполненных из аустенитной стали 12Х18Н10Т;

 на основе современной элементной и электронной базы разработан спиральный матричный акустический преобразователь для контроля структуры конструкционных материалов ручным и автоматизированными методами с обеспечением изотропной чувствительности в области прозвучивания;

 установлена эффективность корреляционных методов анализа уникальных идентификационных признаков для проведения процедуры аутентификации.

<u>Практическая ценность работы</u> состоит в том, что разработанная конструкция преобразователя применима для проведения исследований широкого класса материалов в области материаловедения, дефектоскопии и дефектометрии. Результаты экспериментального исследования корреляции УИП для аустенитных сталей являются основой для построения

промышленного комплекса, реализующего принципы акустической идентификации.

Результаты работы внедрены в производственный процесс АО ОДЦ УГР, а также в учебный процесс кафедры физико-энергетических установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, что подтверждено соответствующими актами, представленными в Приложениях В и Г.

Практическая значимость подтверждается выполнением автором в качестве соисполнителя следующих научно-исследовательских работ, посвященных разработке и применению ультразвукового метода контроля и идентификации сварных соединений объектов атомной энергетики:

Грант по постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 № 220.
Направление научных исследований – «Неразрушающий контроль и диагностика в производственной сфере» (2010 – 2013 гг.). Договор № 11.G34.31.0002 от 30 ноября 2010 г.

2. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 - 2020 годы» -Разработка технологии диагностики И оценки остаточного pecypca контейнеров отработавшим ядерным топливом С на базе метода ультразвуковой томографии, соглашение о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.575.21.0048, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0048.

3. Государственное задание «Наука» Министерства образования и науки Российской Федерации, тема № 0.1325.2014.

 Договор № 5361/285 от 1 августа 2014 года с ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» на разработку и поставку комплекса ультразвукового контроля изделий ИТЭР.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их обоснованностью, применением современной аппаратурной базы, большим объемом

экспериментальных данных и их обработкой с использованием методов корреляционного анализа в разработанном программном продукте.

Личный вклад автора заключается в предложении конструкции спирального матричного датчика ДЛЯ получения наиболее полных качественных и количественных данных о структуре конструкционных материалов, методов корреляционного использовании анализа ДЛЯ УИП; разработке и реализации установления идентичности модели формирования УИП на основе измеренных акустических данных, а также в проведении экспериментов, обработке полученных данных и их анализе.

Апробация работы и публикации: материалы диссертации были всероссийских и международных представлены на конференциях И симпозиумах: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Современные проблемы технической физики», Томск, 2011; Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2011, 2014; «Ядерные технологии – вызовы XXI века: нераспространение, разоружение и мирное применение атомной энергии», Томск, 2011; The 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2012), Томск, 2012; Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле, п. Листвянка, 2013; 52nd Annual Conference NDT 2013, Телфорд, 2013; молодежная школа-конференция: «Неразрушающий контроль», п. Листвянка, 2013; 35th ESARDA Annual Meeting, Брюгге, 2013; Научно-техническая конференция и выставка инновационных проектов Сибирского федерального округа, Кемерово, 2014; III Всероссийский форум школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение», Томск, 2015; 2015 International Congress on Ultrasound, Метц, 2015.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 статьях в журналах из списка ВАК (в т. ч. 2 статьи в БД SCOPUS), 1 статье в зарубежном профессиональном нерецензируемом журнале, а также в 13 сборниках трудов и материалов российских и международных конференций.

Объем и структура работы: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений и списка используемой литературы. Общий объем диссертации 158 страниц, включая 75 рисунков, 29 таблиц и список использованных источников из 110 наименований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПЛОМБИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕПРИСУЩИХ ПРИЗНАКОВ МАТЕРИАЛА В ЦЕЛЯХ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯМ

1.1 Использование систем пломбирования

Нормативная документация определяет следующие цели осуществления надзора за учетом и контролем ядерных материалов с применением пломб:

- предотвращение и выявление нарушений в учете и контроле ядерных материалов при обращении с ними;
- обеспечение достоверности сведений о наличии ранее проверенных ядерных материалах и их характеристиках и исключение необходимости их повторных проверок с проведением инспекционных измерений при осуществлении инспекций;
- исключение возможности сокрытия неконтролируемых действий с ЯМ при выявлении аномалий в их учете и контроле или при выявлении инцидентов с ЯМ [17].

Стандартно применяется два класса пломбировочных устройств (ПУ) – пассивные и активные [18]. Но при этом, согласно НП-030-12, допускается не устанавливать пломбы на учетные единицы (УЕ), из которых ЯМ не могут быть извлечены без нарушения целостности УЕ, целостность которых обеспечена их конструкцией и может быть подтверждена визуальным или инструментальным контролем (сравнением образов гамма- или ультразвукового сканирования швов сварки) [19]. Рассмотрим традиционные пломбировочные устройства.

1.1.1 Пассивные ПУ

Отличительной особенностью пассивных пломб является то, что они не передают информацию о вскрытии контролирующей организации, то есть удостовериться в сохранности ЯМ можно только на месте. Они обычно недороги и предназначены для одноразового использования. В данный класс входят хрупкие фольги или пленки, пластиковые обертки, клейкие этикетки, чувствительные к давлению, «запирающие» болты, проволоки или кабели, другие необратимые (теоретически) механические сборки, упаковки или секретные контейнеры с индикацией вмешательства, оптоволоконные пучки, меняющие пропускание света после перерезания, и другие устройства или материалы, необратимо повреждающиеся или изменяющиеся при манипуляциях с ними [22-23].

Одним из широко применяемых ПУ является «Кобра». Устройство относится к оптоволоконным устройствам индикации вмешательства. Проверка её осуществляется путем просвечивания оптического кабеля пломбировочной системы. Далее сопоставляются два изображения оптической картины: изначальная с картиной проверки. То есть уникальная комбинация световых пятен должна быть одинаковой для оригинального и проверочного изображений [24]. Такой способ проверки целостности пломбировочной системы упрощает и ускоряет процесс учёта и контроля ЯМ.

Пломбировочная система «Кобра» (рис. 1.1) была разработана в Sandia National Laboratories, США по запросу МАГАТЭ путем упрощения конструкции оптоволоконного устройства «Питон» [23].



Рисунок 1.1 – Устройство пломбировочной системы «Кобра» [24]

Пломбировочная система «Кобра» в общем случае состоит из пассивного оптоволоконного кабеля (4) диаметром 3,3 мм, зажимного оборудования (7, 8, 9) и оборудования проверки целостности пломбы. Кабель сформирован из 64 пластиковых оптических волокон, каждый из которых имеет диаметр 254 мкм. Оптоволоконный кабель (4) вставляется в отверстие корпуса (2). Вдоль режущей направляющей (9) вставляется лезвие (8) для того, чтобы перерезать некоторые из оптических волокон оптоволоконного кабеля (4) внутри корпуса пломбы (2). В то же время, кабель (4) фиксируется внутри корпуса пломбы зажимными шурупами.

Когда торцевую поверхность пломбы (3), на которой находится уникальный идентификационный номер, облучают светом, свет попадает на один из концов (5) оптоволоконного кабеля (4), проходит по всей длине кабеля и выходит на другом конце (6). В результате образуется оптическая картина из световых точек (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Уникальный оптический образ идентификации пломбы [24]

Оптическая картина является уникальной для каждой пломбы, как отпечатки пальцев у человека, так как при монтаже оптического кабеля (4) через корпус пломбы (2) волокна кабеля занимают разное положение внутри оболочки кабеля [24].

Пломбировочная система применяется в сфере учёта и контроля ЯМ и РВ. «Коброй» опечатываются контейнеры с ЯМ или РВ при транспортировке

либо их хранении. Но транспортировка ЯМ или РВ всегда неизбежно связана с тряской и вибрацией, что увеличивает вероятность повреждения обычной пластиковой пломбы. Кроме того, у транспортируемых контейнеров неизбежен люфт крышки по отношению к корпусу контейнера, что также снижает срок службы и приводит в негодность легко рвущиеся части пломбировочной системы «Кобра». Главным недостатком пломбировочной системы «Кобра» являются её невысокие прочностные характеристики, что уменьшает срок её службы и облегчает снятие с охраняемого контейнера при несанкционированном доступе.

В РФ нашла широкое применение пломба оптическая петлевая ОПП-1М (рис. 1.3) [25]. Оптические петлевые пломбы и запорно-пломбировочные устройства являются устройствами индикации вмешательства многоразового использования и предназначены для применения на предприятиях, работающих с опасными материалами и специальными изделиями.



Рисунок 1.3 – Пломба оптическая петлевая ОПП-1М [25]

При каждом перепломбировании создается уникальный оптический образ, идентификация которого обеспечивается автоматическими средствами. Для оптическая пломба содержит информационный ЭТОГО элемент, выполненный из дискретных частиц, расположенных с возможностью многократного перемещения и закрепления механизмом фиксации в процессе пломбирования частей В полом корпусе, состоящем ИЗ двух co

светопрозрачным участком, т. е. корпус, состоящий из двух зафиксированных относительно друг друга деталей, в котором размещены участки соединенных между собой концов связующего тела, связанного с охраняемым объектом, и в котором по меньшей мере одна из деталей выполнена светопрозрачной, при этом на поверхности корпуса выполнены элементы для единообразной установки автоматического устройства считывания оптического образа информационного Пломба снабжена элемента. дополнительным информационным элементом, при этом информационными элементами служат участки каждой из составляющих корпус деталей, доступные для оптического зондирующего излучения, структура которых характеризуется случайно распределенными неоднородностями, отражающими оптическое зондирующее излучение, а соединенные между собой участки связующего тела свободно размещены в полости корпуса. Механизм фиксации выполнен в виде подпружиненного в сторону светопрозрачного участка поршня, взаимодействующего с подвижной и неподвижной частями корпуса пломбы. Разрешена к применению на АЭС, входящих в концерн «Росэнергоатом», на основании РД ЭО 0555-2004 [25].

Традиционная конструкция пломбы содержит навесной элемент, как правило, гибкий шнур или трос, протянутый через специальные проушины в охраняемом объекте, корпус из пластичного металла, в котором при установке пломбы образуется закрытая камера для размещения узла навесного элемента, и информационный элемент для идентификации установщика пломбы в виде клейма, выдавленного пломбиром при обжатии концов корпуса.

Недостатком данной конструкции является наличие вероятности подделки рисунка на информационном элементе.

Достоинство данной конструкции заключается в том, что в настоящем изобретении создается уникальный оптический образ при каждом перепломбировании, осуществляемым движением подвижной части корпуса конструкции пломбы. При оптические средства регистрации ЭТОМ обеспечивают возможность автоматической идентификации пломбы [25].

1.1.2 Активные ПУ

Активные пломбировочные устройства имеют возможность пересылки закодированного состояния устройства индикации вмешательства ПО компьютерным сетям, что формирует дополнительные идентификационные признаки. Сигналы сохранности и вскрытия, а также другая информация о состоянии объекта автоматически передаются на пульт контроля в режиме реального времени. Выполнение пломбировочным устройством таких функций невозможно без использования электроники. В этой связи активные пломбировочные устройства также называют электронными пломбировочными устройствами (ЭПУ). ЭПУ – это комплекс технических средств, включающий в себя элементы памяти, блок питания, модулятор, шифратор, дешифратор, приемопередатчик и внешние средства для передачи и снятия информации об объекте [26-27]. Внешние средства могут быть реализованы как в стационарном, так и в переносном варианте.

Яркими представителями данного класса ПУ являются устройства VACOSS и EOSS. Электронное пломбировочное устройство VACOSS является активной многоразовой оптоволоконной пломбой, предназначенной применения В течение длительного времени С возможностью ДЛЯ периодического доступа к объекту. Для удаления данной пломбы с контейнера необходимо отключить или перерезать оптоволоконный кабель. Любые такие манипуляции с пломбой или оптоволоконным кабелем фиксируются и записываются в памяти пломбы как взлом. События о попытках взлома, записанные в память пломбы, можно получать удаленно по компьютерным сетям [26].

Данное ПУ состоит из корпуса пломбы и оптоволоконного кабеля. Корпус пломбы изготовлен водонепроницаемым с целью защиты электроники, находящейся внутри. Электроника обнаруживает любые манипуляции с пломбой и записывает любые вскрытия пломбы. Для установки пломбы необходимо продеть оптоволоконный кабель через

запирающий механизм контейнера и закрепить его в корпусе пломбы. Сигнал опроса в виде инфракрасного луча через оптоволоконный кабель пропускается через случайные промежутки времени, в среднем раз в 250 миллисекунд. Установка и вскрытие пломбы или любой разрыв оптоволоконного кабеля фиксируется VACOSS и записывается в памяти.

Пломбировочное устройство EOSS (The Electronic Optical Sealing System) (рис. 1.4) является многоразовым механическим пломбировочным устройством. Пломба EOSS использует оптоволоконный кабель и датчик освещенности для записи любого события открытия/закрытия. Данное пломбировочное устройство работает путем передачи световых импульсов через оптоволоконный кабель и мониторинг принимаемого сигнала. Если кабель не поврежден, то импульсы света будут получены датчиком, встроенным в корпус пломбы. Если импульсы не получены, то пломба считается вскрытой [27].



Рисунок 1.4 – Пломбировочное устройство EOSS [27]

К недостаткам данных ПУ относится сложность конструкции устройств, что обуславливает их высокую стоимость, низкую устойчивость к случайным механическим повреждениями и ограниченные условия применения, например недостаточный нижний предел рабочей температуры пломбы для применения данных пломб при транспортировке в зимних условиях. Таким образом можно заключить, что применяемые ПУ, как пассивные, так и активные, имеют значимые недостатки, ограничивающие их надежное применение в целях учета и контроля ЯМ. Госкорпорация «Росатом» подчеркивает, что на данный момент не существует пломбировочных устройств, устойчивых к подделке. При этом все ЯМ, объединенные в учетные единицы, должны подлежать строгому учету и контролю. Учетной единицей может являться ЯМ как в балк-форме, так и объединенный в ТВС или в контейнеры с ОЯТ. Контейнеры обычно подразделяются на два класса: транспортно-упаковочные комплекты и пеналы для хранения ОЯТ. В данной диссертационной работе в качестве исследуемой учетной единицы выбраны пеналы для сухого хранения ОЯТ.

1.2 Сухое хранение ОЯТ

Сухое хранение ОЯТ является альтернативой технологии хранения в водных бассейнах. При сухом хранении отсутствует жидкий охладитель, что исключает его протечки, улучшаются условия хранения (поскольку вода является более агрессивной средой хранения по сравнению с воздухом и инертными газами), обеспечивающие целостность ТВЭЛов. Упрощается обслуживание хранилищ, особенно при охлаждении естественной конвекцией, так как не требуется применение насосов, уменьшается доля электрооборудования. Сухое хранение приводит к уменьшению объема образования вторичных радиоактивных отходов по сравнению с мокрым способом хранения. Отличительной чертой сухого способа является хранение ОЯТ в герметичных пеналах, заполненных либо воздухом, либо инертным газом. [28] Герметизация пенала чаще всего происходит посредством сварки пенала и крышки [15].

К пеналам предъявляются строгие требования. Прежде всего, должна быть гарантия того, что там не произойдет цепная реакция ядерного деления. Среди других важных требований – отвод тепла, радиационная безопасность, механическая устойчивость. Толщина стенок контейнеров должна быть такой, чтобы мощность дозы излучения на поверхности контейнера не превышала дозу допустимых пределов и не была опасной для обслуживающего персонала, населения и окружающей среды. Также необходимо, чтобы контейнеры оставались неповрежденными в случае взрыва, пожара, наводнений, землетрясений и даже при падении на них легких самолетов. Ядерная безопасность при контейнерном хранении достигается за счет применения дистанцирующих и поглощающих элементов внутри контейнера, а также размещением отработавших тепловыделяющих сборок в пеналах, что обеспечивает их изоляцию друг от друга вне зависимости от времени и практически любых проектных и запроектных внешних воздействий [29].

1.2.1 Основные типы конструкций пеналов с ОЯТ

Контейнеры сухого хранения предполагают использование в качестве защитных корпусов металлические, бетонные И металлобетонные конструкции. Внутри контейнера размещаются тепловыделяющие сборки с ОЯТ, разделенные дистанцирующими элементами, корпус герметично закрывается крышкой. Также внутри контейнера располагаются теплоотводящие элементы ДЛЯ исключения перегрева содержимого контейнера, нейтронная защита для обеспечения защиты окружающей среды и обслуживающего персонала от радиоактивного излучения. На крышку и днище контейнера устанавливаются демпфирующие устройства для снижения вредных последствий воздействия внешней силы и предотвращения повреждения корпуса контейнера и его содержимого в результате неаккуратного обращения с ним или наступления внештатной ситуации, например падении при погрузочно-разгрузочных операциях [30].

Первыми к вопросу сухого хранения подошли Соединенные Штаты Америки. С конца 70-х годов страна нуждалась в создании альтернативного метода для долговременного хранения ОЯТ как замены бассейному типу

хранения, поскольку последние становились переполненными в разных регионах страны. Тогда встал вопрос о проектировании систем для сухого хранения ОЯТ в контейнерах.

Темпы развития производства контейнеров сухого хранения ОЯТ подхватили Германия, Литва, Украина, Россия и др. Значительную долю мирового рынка занимают контейнеры компании General Nuclear Systems, Inc., страна-производитель – Германия [31-33].

В настоящее время в России эксплуатируются 11 блоков с реакторами РБМК-1000 И 9 блоков реакторами BB3P-1000. с Мощность радиохимического завода РТ-1 на ПО «Маяк» составляет 150 т/год и в 2007 г. составил 400 т/год. С пуском завода РТ-2 на Горно-химическом комбинате (ГХК) к 2025 г. суммарная мощность радиохимических заводов составит 1900 т/год (по урану). Наиболее значимые объемы ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000 в настоящее время не перерабатываются и находятся на способом в приреакторных бассейнах выдержки, хранении мокрым промежуточных хранилищах на АЭС и централизованном хранилище в здании 1 на ГХК, которые близки к заполнению [34]. Поскольку накопление отработавшего ядерного топлива существенно опережает возможности радиохимической переработки, то необходимым условием работы АЭС является его длительное контролируемое хранение.

По проекту, разработанному ГИ ВНИПИЭТ (Санкт-Петербург), в 2005 году начато сооружение централизованного сухого хранилища ОЯТ реакторных установок РБМК-1000 и ВВЭР-1000 на Горно-химическом комбинате. Строительство первого пускового комплекса было завершено в 2011 году. Вместимость комплекса составляет 8129 тонн [34].

Ко всем методам сухого хранения ОЯТ предъявляются следующие основные требования:

обеспечение сохранности ОЯТ в течение времени не менее 50 лет;

- обеспечение температуры на оболочке ТВЭЛ при хранении в среде инертного газа не более 300 °С для топлива РБМК-1000 и 350 °С для топлива ВВЭР-1000;
- обеспечение долговечности строительных конструкций хранилища в течение не менее чем 100 лет;
- обеспечение пассивного способа отвода тепла от хранимого топлива;
- устойчивость хранилища к внешним воздействиям (падению самолета, воздушной ударной волне, летящим предметам, землетрясению, урагану, смерчу);
- обеспечение возможности удобной и быстрой идентификации источника появления радиоактивных загрязнений [28].

Существует большое разнообразие патентов по организации сухого хранения ОЯТ, например:

- металлобетонный контейнер для транспортировки и/или хранения ОЯТ ядерных реакторов с герметизацией болтовыми соединениями (RU 2189648) (для ядерных реакторов типа РБМК);
- металлический контейнер для транспортировки и/или хранения отработавшего ядерного топлива со сварной герметизацией (RU 2348085) (для ядерных реакторов типа ВВЭР-1000);
- металлобетонный контейнер для транспортировки и сухого хранения отработанного ядерного топлива ядерных реакторов со сварной герметизацией (RU 2266578) и др.

На Горно-химическом комбинате в 2013 году завершились бросковые испытания 31-местного контейнера для хранения ОЯТ. Данный контейнер – изобретение группы работников Горно-химического комбината (патент RU 2435239) [15]. Сконструирован и изготовлен контейнер также на ГХК. Схематично контейнер выглядит следующим образом (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Контейнер RU 2435239 сухого хранения ОЯТ на ГХК: 1 – корпус контейнера; 2 – плоское днище; 3 – амортизатор; 4 – крышка; 5 – решетка; 6 – диски; 7 – скрепление дисков; 8 – ячейки для размещения ампул [15]

Герметичный контейнер содержит корпус, привариваемую к нему крышку с грузозахватным устройством в виде центрального грибка и дублирующего захватного бурта, выполненного по периферии крышки, грибок крышки клапана для откачки и заполнения пенала средой хранения и контроля герметичности и управляющий им стержень-заглушку, решетку, выполненную в виде набора дисков с соосными отверстиями, образующую ячейки для размещения отработавших тепловыделяющих сборок, закрепленных на вертикальных стойках на расстояниях, позволяющих осуществлять установку ампул с заданной непрямолинейностью. В корпусе контейнера выполнена кольцевая канавка, в центральном грибке крышки установлен замок. В центральное отверстие дисков решетки устанавливается дополнительная ампула с пучком ТВЭЛов [15].

В целях организации учета и контроля данных пеналов с ОЯТ, являющихся УЕ, применяются традиционные системы пломбирования, в т. ч. замковые и тросиковые пломбы [33]. Подобные устройства устанавливаются в специально изготовленные проушины контейнера и могут быть легко повреждены при транспортировке и установке на постоянное хранение, что вызовет аномалию и потребует дополнительных процедур в рамках обеспечения учета и контроля. Поскольку герметизация подобных объектов выполняется сварным соединением и невозможно извлечь ЯМ, не нарушив целостность УЕ, то представляется возможным, согласно НП-030-12, в качестве альтернативы ΠУ применить методы сличения образа герметизирующего соединения [19]. Образ будет получен посредством применения ультразвукового контроля. Уникальность данного образа будет основана на стохастическом распределении зерен металла, образующего особенно сварное соединение, поэтому важно рассмотреть процесс кристаллизации металла [16].

1.2.2 Структура герметизирующего сварного соединения

Сварка рассматриваемого в данной работе объекта контроля производится по технологии аргонно-дуговой сварки, которая относится к термическому классу, подклассу дуговой сварки, как описано выше.

Ключевыми аргонно-дуговой элементами сварки являются (неплавящийся вольфрамовый) электрод, вокруг которого находится керамическое сопло, из которого во время сварки дует инертный газ, в данном случае – аргон. Преимущества аргона заключаются в том, что он практически не вступает во взаимодействие с расплавленным металлом, а также в том, что он тяжелее воздуха, следовательно, вытесняет его из зоны сварки (не происходит контакта с атмосферой). При сварке плавлением кромки

соединяемых элементов и дополнительный металл переходят в жидкое состояние. Расплавленные основной и дополнительные металлы, сливаясь, образуют общую сварочную ванну, находящуюся в состоянии непрерывного движения и перемешивания. Границами ванны служат оплавленные участки основного металла и ранее образовавшегося шва. В процессе сварки источник теплоты перемещается вдоль соединяемых кромок, а вместе с ним движутся плавильное пространство и сварочная ванна. [35] При дуговой сварке плавильное пространство можно условно разделить на две области: головную, где горит дуга и происходит плавление основного и дополнительного металлов, и хвостовую, где располагается сварочная ванна и начинается ее кристаллизация (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Граница сплавления А [36]

Как и при обычном затвердевании отливок, переход металла сварочной ванны из жидкого в твердое состояние называют первичной кристаллизацией. Как и в случае кристаллизации слитка, характерным структурным элементом сварочных швов являются дендриты – древовидные кристаллы со стволами и Рост наиболее ветвями. кристаллов активно идет В направлении, перпендикулярном поверхности теплоотвода. Поэтому процесс первичной кристаллизации обычно заканчивается формированием столбчатых кристаллов [37].

Структуру шва, сформированную в результате первичной кристаллизации, называют первичной. При затвердевании металла в нем развиваются диффузионные процессы, стремящиеся выровнять химический состав участков образовавшихся различных кристаллитов. Однако из-за значительных скоростей остывания металла и медленного протекания диффузии В твердых растворах не происходит процессов полного выравнивания химического состава в металле шва. Это и определяет наличие в микроструктуре шва химических неоднородностей по отдельным зонам литого металла (зональная ликвация), оказывающих существенное влияние на его свойства [36].

Первичная кристаллизация сварочной ванны начинается от частично оплавленных зерен основного металла или столбчатых кристаллитов (при многопроходной сварке), являющихся готовыми центрами кристаллизации. Условную поверхность раздела между зернами основного металла и кристаллитами шва называют границей шва, или границей сплавления. Как отмечалось выше, микроструктура металла шва при сварке плавлением имеет столбчатое строение. Столбчатые кристаллы имеют сравнительно крупные размеры (0,3 – 3,0 мм) и легко различимы как с помощью металлографии, так и с помощью ультразвука [38]. При однослойной сварке и сравнительно малом времени существования сварочной ванны (малый объем ванны, повышенная скорость сварки) столбчатые кристаллы могут прорасти до встречи в области центральной линии шва, не изменяя своего направления.

При большой ванне и медленной ее кристаллизации в центральной части шва образуется небольшая зона равноосных кристаллов, возникших в условиях естественной кристаллизации [39].

При многопроходной (многослойной) сварке рост кристаллитов последующего слоя начинается, как отмечалось выше, от частично оплавленных кристаллитов предыдущего слоя. Направления кристаллитов отдельных слоев, как правило, не совпадают. При многослойной сварке скорость охлаждения каждого из слоев обычно больше скорости охлаждения ванны при однослойной сварке металла такой же толщины. Поэтому кристаллическое строение отдельных слоев в целом оказывается более мелким и плотным, с менее выраженной ликвацией примесей по зонам [35].

Для металлов и сплавов, претерпевающих при охлаждении полиморфные превращения, первичная структура сохраняется до температуры полиморфного превращения. Для сплавов на основе железа полиморфное превращение проявляется в переходе а - Fe [^] y – Fe [40]. Переход металла шва в твердом состоянии из одного полиморфного состояния в другое называют вторичной кристаллизацией.

При вторичной кристаллизации зародыши новых зерен образуются на границах старых. Число этих зародышей и скорость их роста зависит от скорости нагрева и охлаждения, степени перегрева и переохлаждения. Это позволяет влиять на размеры зерен металла в сварном соединении.

Если металл после сварки подвергнуть вторичной кристаллизации, то нарушается неблагоприятное дендритное строение и возникает новая, более мелкозернистая структура [40].

На данный момент не существует технологии, позволяющей воссоздать расположение и размеры зерен, что позволяет утверждать, что данная особенность устойчива Таким образом, К подделке. уникальность расположения зерен металла в структуре сварного шва позволяет использовать ее в качестве идентификационного признака. Вследствие уникальности исследуемого признака материала представляется возможным биометрической идентификации, опереться на ОПЫТ а именно дактилоскопического метода, обрабатывающего уникальные признаки отпечатков пальцев.

1.3 Дактилоскопическая идентификация внутреннеприсущих признаков

Распознавание отпечатков пальцев основывается на сравнении ключевых точек образцов в характерных областях (выступах и впадинах). Уникальность отпечатка пальца исключительно определена локальными

свойствами выступов и их соотношениями. Существует 150 различных локальных характеристик выступов (островки, короткие выступы, полости и т. д.). В каждом отпечатке пальца можно определить два типа признаков – глобальные и локальные. Глобальные признаки – те, которые можно увидеть невооружённым глазом, а локальные признаки или детали - уникальные для каждого отпечатка признаки, определяющие пункты изменения структуры папиллярных линий (окончание, раздвоение, разрыв и т. д.), ориентацию папиллярных линий [41]. Каждый отпечаток содержит до 70 деталей.

Практика показывает, что отпечатки пальцев разных людей могут иметь одинаковые глобальные признаки, но совершенно невозможно наличие одинаковых деталей [42]. Поэтому глобальные признаки используют для разделения базы данных на классы и на этапе она. На втором этапе распознавания используют уже локальные признаки.

Следует различать процессы идентификации и аутентификации. Идентификация – процедура, в результате выполнения которой для субъекта выявляется его УИП, однозначно определяющий данный субъект. Процедура идентификации напрямую связана с аутентификацией: субъект проходит процедуру аутентификации, и если аутентификация успешна, то система на основе факторов аутентификации определяет УИП субъекта [43]. При этом достоверность идентификации полностью определяется уровнем достоверности выполненной процедуры аутентификации.

В настоящее время выделяют три класса алгоритмов сравнения отпечатков пальцев.

Корреляционное сравнение два изображения отпечатка пальца накладываются друг на друга, и подсчитывается корреляция (по уровню интенсивности) между соответствующими пикселями, вычисленная для различных выравниваний изображений друг относительно друга (например, смещений И вращений). По путем различных соответствующему коэффициенту принимается решение об идентичности отпечатков.

Сравнение по особым точкам – по одному или нескольким изображениям отпечатков пальцев со сканера формируется шаблон, представляющий собой двухмерную поверхность, на которой выделены конечные точки и точки ветвления. При сравнении на отсканированном изображении отпечатка также выделяются эти точки, карта которых сравнивается с шаблоном и по количеству совпавших точек принимается решение по идентичности отпечатков. В работе алгоритмов данного класса также используются механизмы корреляционного сравнения, но при сравнении положения каждой из предположительно соответствующих друг другу точек.

Сравнение по узору – в данном алгоритме сравнения используются непосредственно особенности строения папиллярного узора на поверхности пальцев. Полученное со сканера изображение отпечатка пальца, разбивается на множество мелких ячеек (размер ячеек зависит от требуемой точности).

Расположение линий в каждой ячейке описывается параметрами некоторой синусоидальной волны, то есть задаются начальный сдвиг фазы, длина волны и направление ее распространения.

Соответственно при получении отпечатка для сравнения он выравнивается и приводится к такому же виду, что и шаблон. Затем сравниваются параметры волновых представлений соответствующих ячеек [44].

Отдельно стоит заметить, что в автоматизированной идентификации существует несколько проблем, связанных со сложностью сканирования и распознавания некоторых типов отпечатков пальцев. В первую очередь это касается маленьких детей, так как их пальцы очень маленькие для того, чтобы хорошем оборудовании получить их отпечатки пальцев с даже на детализацией, приемлемой для распознавания. Кроме этого, около 1 % взрослых людей, являются обладателями настолько уникальных отпечатков работы С приходится или разрабатывать пальцев, что для НИМИ

специализированные алгоритмы обработки, или делать исключение в виде персонального для них отказа от биометрии [45].

В биометрии широко используются программы распознавания отпечатков пальцев (ОП). Известны два основополагающих алгоритма распознавания отпечатков пальцев: по отдельным деталям (ключевым точкам, КТ развилкам и окончаниям, называемым минуциями) и по рельефу всей поверхности пальца. В первом случае устройство регистрирует только некоторые точки, уникальные, свойственные конкретному отпечатку, и определяет их взаимное расположение. Во втором случае обрабатывается изображение всего отпечатка.

Алгоритм инвариантного распознавания отпечатков пальцев по ключевым точкам состоит из трех этапов: предварительная обработка изображения, центрирование, распознавание [46].

На этапе предварительной обработки каждое изображение ОП должно быть бинаризовано и отфильтровано. На этом этапе в черно-белом пиксельном изображении ОП устраняется часть ложных пропечаток, папиллярные линии утончаются до значения в один пиксель, логически устраняются некоторые их короткие ложные ответвления и небольшие разрывы [45]. В этом изображении должны быть найдены граничные точки, определяющие контур информативной области ОП, его центр, т. е. проведена сегментация ОП, а также выделены и описаны КТ в первичной (декартовой) системе координат относительно центра.

Выделение КТ и вычисление их координат выполняется в первичной системе координат относительно неточного центра ОП путем просмотра каждого пикселя отпечатка и его ближайшей окрестности. Если в этом пикселе папилляр разветвляется или оканчивается, он принимается за КТ [45].

Широко применяемым инвариантным алгоритмом распознавания ОП является метод корреляционного сравнения. Сопоставление двух ОП основано на многократных сравнениях множеств КТ [46]. В окрестности каждой КТ проводится поиск ближайшей КТ другого отпечатка. Если она расположена на

допустимом удалении, то эти две точки считаются совпавшими. В качестве меры близости двух ОП принимается число пар их КТ, признанных совпавшими. При сопоставлении двух ОП за достоверный центр одного из ОП принимается поочередно каждый пиксель его центральной области, размер которой определяется величиной возможного смещения ОП при сканировании и может составить до 10 % от длины рамки изображения ОП [45-46]. Производится сравнение КТ с заданным порогом идентичности, равным 65 % [45].

Общие принципы корреляционного сравнения в дактилоскопии являются универсальными и могут быть перенесены для применения в других задачах установления идентичности объектов. Основными этапами будут являться отбор данных, фильтрация, бинаризация, сегментация и непосредственно сравнение по одному из известных алгоритмов корреляции. В случае адаптации данной методики к идентификации герметизирующего соединения контейнера с ОЯТ необходимо выбрать наиболее подходящую аппаратуру для отбора ультразвуковых данных.

1.4 Устройства отбора внутреннеприсущих признаков

Стандартный состав системы ультразвукового контроля представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Функциональные блоки системы УЗК

Станция управления и обработки данных представляет собой ЭВМ с предустановленным ПО. Требования к мощности определяются исходя из

задач контроля, необходимости визуализации полученных данных и представления результатов в режиме реального времени [47-48].

Под блоком ультразвуковой электроники подразумевается набор плат для генерации, передачи и приема акустических импульсов. Также сюда входит ΑЦΠ для цифровой обработки сигналов, полученных С преобразователей. Различают пьезоэлектрических одноканальные И устройства. Последние большее многоканальные находят все различных задачах контроля распространение В ввиду возможности применения современных фазированных антенных решеток (ФАР) [49].

Основным предназначением ультразвуковых преобразователей является преобразование электрической энергии в механическую. В настоящее время в России большинство ультразвуковых преобразователей изготавливают на пьезоэлектрической керамики (пьезокерамики). Пьезокерамика основе представляет собой химическое соединение или твердый раствор зерен. Наибольшее распространение получила группа пьезокерамических материалов типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС) [50].

Выбор данного типа материалов является не случайным, именно он обладает пьезоэлектрически эффектом. Он заключается в том, что если упруго деформировать пьезопластину, то на ее поверхности возникает разность потенциалов, изменение во времени и величина которых пропорциональны такому механическому воздействию [51]. С другой стороны при подаче электрического сигнала на поверхности пьезопластины происходит ее упругая деформация.

С целью обеспечения необходимых электрофизических характеристик при проектировании пьезокерамических преобразователей обычно используют пьезоэлемент определенных формы и размеров из определенного пьезокерамического материала [50].

Классифицировать пьезоэлектрические преобразователи можно по разным принципам (рис. 1.8). Например, существуют разные виды ПЭП и

разные углы ввода УЗ-волны, также могут отличаться конструкция ПЭП и тип ввода ультразвуковой волны, число пьезоэлементов, динамика сканирования в плоскости падения, и т. д. [50-52].



Рисунок 1.8 – Виды классификации ультразвуковых преобразователей

По способам ввода УЗ-колебаний ПЭП подразделяют на контактные, щелевые, иммерсионные И бесконтактные [53]. Хотя контактные преобразователи нашли наибольшее применение в промышленности, их основным недостатком является нестабильность акустического контакта в процессе сканирования преобразователя. Иммерсионный ввод УЗ-колебаний всего используют при автоматизированном контроле чаще изделий небольшого размера или изделий простой геометрической формы, например труб.

Иммерсионные преобразователи обладают рядом специфических преимуществ по сравнению с контактными преобразователями:

 возможность проведения контроля с высокой скоростью за счет автоматизации процесса;

- обеспечение полного контакта между преобразователем и контролируемым объектом, что препятствует снижению чувствительности;
- повышение разрешающей способности благодаря фокусировке [54].

Число пьезоэлементов в ПЭП также является классификационным признаком (одно-, двух- и многоэлементные). Обычно многоэлементные ПЭП называются акустическими системами. К последним также относятся ПЭП в формирующих виде фазированных антенных решеток, заданную направленность акустического поля за счет последовательного возбуждения пьезоэлементов по выбранному временному закону. В режиме ФАР оператор может при помощи блока электроники управлять несколькими лучами от одного преобразователя путем изменения задержки возбуждения отдельных элементов или группы элементов. Точное управление лучом, включая угол, фокус и размер, приводит к повышению вероятности обнаружения, а также к улучшению определения размеров дефектов [52, 54].

Один преобразователь с ФАР воспроизводит возможности многих обычных ультразвуковых преобразователей и призм [55]. Благодаря снижению времени оценки показаний при использовании нескольких углов ввода луча осуществляется экономия времени и затрат на проведение контроля.

В свою очередь, ФАР делятся на следующие типы в зависимости от взаимного расположения элементов:

– линейный;

- секторный;

- двумерная матрица [54-55].

Линейный преобразователь представляет собой один ряд элементов, который обычно создается разрезанием большой прямоугольной пьезокерамической пластины. Луч управляется в одной плоскости.

Секторный преобразователь также представляет собой один ряд элементов, но который выполнен криволинейным образом для создания

требуемой формы луча или соответствия геометрии детали, подвергаемой контролю. Луч управляется в одной плоскости.

Двумерная матрица состоит из нескольких элементов, расположенных в виде решетки, которая также может быть криволинейной. Луч управляется в трех измерениях [55].

Характеристика ультразвукового луча зависит от множества факторов. На производительность, например, влияют размеры элемента, частота и уровень демпфирования. Но также поведение ультразвукового луча ФАР зачастую зависит от положения, размера и группирования мелких элементов, необходимых для создания эффективной апертуры (рис. 1.9), эквивалентной традиционным ультразвуковым ПЭП [52-53].

Происходит группировка элементов ΦΑΡ для формирования эффективной апертуры, которой рассеяние быть ДЛЯ пучка может аппроксимировано традиционных ультразвуковых С помощью преобразователей [55].



Рисунок 1.9 – Формирование эффективной апертуры: а) одноэлементный датчик; б) линейная решетка; в) матрица

При проектировании ФАР необходимо всегда одновременно учитывать и величину правильного шага решетки, и ширину элемента или апертуры. В то время как большое количество элементов улучшает управляемость лучом, обеспечивает достижение точной фокусировки и сокращает побочные лепестки, такая конфигурация требует больших затрат на изготовление ФАР и усложняет процесс эксплуатации. Стандартные ПЭП поддерживают апертуры до 16 элементов. Увеличение расстояния между элементами может показаться легким способом увеличения размера апертуры, но это создает нежелательные побочные лепестки. В таком случае апертура называется разреженной [56].

Коэффициент распределения $DF_{ij}(1)$ показывает, каким образом должны быть расположены элементы апертуры решетки. DF_{ij} – это относительная мера расстояния между і и ј элементами:

$$DF_{ij} = 2d_{ij}/\lambda, \tag{1}$$

где d – расстояние между центрами і и ј элементов;

λ – длина волны.

DF=1 для всех і и ј элементов стандартной матричной решетки с расположением элементов в соответствии с теоремой Котельникова [57]. Матричный вид коэффициента распределения характеризует чувствительность как зависимость от угла раскрытия луча.

К сожалению, применение ФАР также имеет свои недостатки. Самым основным из них являются помехи, возникающие при реконструкции объекта контроля и визуализации изображений. Они значительно усложняют процедуру интерпретации сигналов, а значит, снижают точность контроля. Подобные помехи могут сыграть значительную роль в корреляционном сравнении данных, полученных при идентификации УЕ, и привести к возникновению аномалии в учете и контроле ЯМ [58-59].

Возникновение помех при реконструкции и искажения изображения напрямую связано с коэффициентом распределения. DF величиной более 4 может вызвать дифракционные искажения, что требует применения специальных фильтров [60]. Стохастическое распределение величин DF уменьшает вероятность возникновения помех, а упорядоченная структура преобразователя повышает возникновение искажений изображения.

Таким образом, при нестандартном распределении элементов внутри преобразователя (отличным образом от линии или прямоугольника) возможно достичь требуемой чувствительности в объеме при небольшом количестве артефактов на полученном изображении. Данный подход может стать оптимальным решением для задач идентификации сварного соединения ввиду объединения большого полученных (объемная количества данных эффективная чувствительности хорошей апертура), достаточной И разрешающей способности [58].

1.5 Выводы к главе 1

Проведенный анализ выявил неудовлетворительное состояние систем пломбирования в целях учета и контроля ядерных материалов. Согласно Рекомендациям по применению систем пломбирования в организациях госкорпорации «Росатом» для целей учета и контроля ядерных материалов «отсутствуют официальные данные о пломбировочных устройствах, которые невозможно подделать». При этом Основные правила учета и контроля ядерных материалов допускают замену пломб на проверку состояния сварного соединения (визуальным осмотром, сравнением образов гамма- или ультразвукового сканирования швов сварки) при условии невозможности изъятия материала из УЕ без нарушения целостности конструкции.

Контейнер для сухого хранения ОЯТ, разработанный специалистами ФГУП ФЯО ГХК и выбранный в качестве объекта контроля в рамках данной работы, имеет герметизирующее сварное соединение, которое обеспечивает соответствие данной учетной единицы требованиям, предъявляемым в НП-030-12. В процессе кристаллизации металла, образующего сварное соединение, каждый раз формируется уникальная структура сварного соединения. Это происходит ввиду стохастического характера ориентации зерен в сварном соединении. Подобный уникальный признак может быть проанализирован инструментарием, применяемым в дактилоскопической

идентификации. Группа алгоритмов корреляционного сравнения зарекомендовала себя как надежный способ проведения процедур сличения двух изображений и принята к применению в данной работе.

Рассмотрев различные элементы ультразвуковых систем, сформируем следующие требования к системе акустической идентификации:

- а) мощная станция обработки данных с ПО, предусматривающим трехмерную визуализацию данных в режиме реального времени в целях сокращения времени на инспекцию;
- б) многоканальный блок ультразвуковой электроники с значением динамики усилительного тракта не менее 100 дБ, ввиду малого размера отражателей, формирующих акустическую картину идентифицируемого сварного соединения;
- в) блок электроники должен предусматривать работу как в одноканальном, так и в многоканальном режиме;
- г) проведение экспериментального сравнения эффективности доступных на рынке одноканальных преобразователей и линейных ФАР для задач идентификации;
- д) разработка конструкции, изготовление и проведение апробации матричной ФАР с оптимизированным разреженным распределением элементов решетки [47-48, 59].
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВНУТРЕННЕПРИСУЩИХ ПРИЗНАКОВ В СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛА

Структура сварного соединения контейнера с ОЯТ, описанная в разделе 1.3.1, выбрана в качестве внутреннеприсущего признака структуры материала контейнера, идентификации подлежащего акустическим методом неразрушающего контроля. Отражатели, находящиеся в контролируемом объеме, могут быть отображены в одно-, двух-, трехмерном представлении. Зависимость получаемого сигнала от времени (А-развертка) является одномерным изображением, которое может быть получено как в единичном количестве при проведении процедуры контроля стандартным ультразвуковым дефектоскопом с одноэлементным ПЭП, так и в качестве набора из n A-разверток в случае использования линейных ФАР и перспективных матричных решеток. Подобные наборы А-разверток могут быть использованы для последующей реконструкции двухмерных секторных и трехмерных конических разверток. Каждая из вышеупомянутых разверток позволяет сформировать уникальный идентификационный признак или массив таких признаков для каждой из учетных единиц в системе УиК. При проведении процедуры установления подлинности объекта контроля – аутентификации – необходимо выполнить процедуру сравнения эталонного УИП, полученного при идентификации, и УИП, полученного при повторном измерении. В целях реализации метода акустической идентификации разработана модель выделения УИП и их последующего сравнения.

2.1 Модель формирования и сравнения уникальных идентификационных признаков в системе учета и контроля

Условно модель подлежит делению на два этапа. Первый этап – формирование УИП из набора А-разверток, полученных во время проведения

ультразвукового контроля, которые являются входными данными на этом Ha обработка этапе. первой стадии этапа происходит измеренных акустических сигналов, что позволяет улучшить соотношение сигнал/шум, отфильтровать заведомо ложные индикации, вызванные несовершенством измерительной техники, и провести сглаживание полученных сигналов. Вторая стадия заключается непосредственно в формировании массива УИП за счет обработки сигнала аналогичным образом с применением процедур дактилоскопии, описанным в п. 1.3. Происходит выделение уникальных сегментов изображения – аналог минуций в дактилоскопии, и их дальнейшая обработка. В результате чего происходит формирование массива УИП, являющимся входными данными для второго этапа модели – проведения корреляционного сравнения. На данном этапе используются различные методики проведения корреляционного анализа для установления степени схожести. Данная характеристика позволяет принять решение о подлинности контролируемой учетной единицы. Второй этап модели используется только при проведении процесса аутентификации, в то время как первый необходим в равной степени как для процесса идентификации, так и аутентификации. Подробнее процессы описаны в п. 1.3. Разработанная модель представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Общее графическое представление модели формирования и сравнения УИП

Рассмотрим каждую из стадий модели более подробно.

2.1.1 Обработка акустических сигналов

В стадию обработки акустических сигналов входит три основных шага (рис. 2.2): фильтрация первичных сигналов или А-разверток, применение алгоритма статистической фильтрации посредством миграции акустических данных и применение сглаживания по Гауссу, для восстановления утраченных во время фильтрации полезных данных.



Рисунок 2.2 – Стадия обработки акустических сигналов

Цель данной стадии – достичь наилучшего качества акустических сигналов и реконструированных изображений на их основе. Наилучшие показания качества реконструкции достигаются с использованием метода формирования синтетических апертур [61]. Реализация данного метода возможна посредством трех основных методик. Так, при реконструкции с помощью формирования синтетической апертуры излучателя (САИ) в определенный момент времени один из элементов решетки предает импульс, а все остальные элементы принимают эхо-сигнал (рис. 2.3). Преимуществом данного метода является возможность использования полной динамической фокусировки при получении и передаче сигнала, что обеспечивает максимальное качество изображения. Недостатком метода является

потребность в высоких объемах памяти для хранения данных, а также возможность возникновения помех, вызванных перемещением преобразователя в процессе сканирования.



Рисунок 2.3 – Принцип работы метода САИ [61]

Метод реконструкции с помощью формирования синтетической апертуры приемника (САП) (рис. 2.4) является обратным, но равнозначным методу САИ. В качестве третьего способа получения синтетических апертур может быть использовано совмещение методов САП и САИ при кодировании сигналов излучателя для каждого элемента апертуры.



Рисунок 2.4 – Принцип работы метода САП [61]

Ввиду технологической сложности создания подобного комбинированного оборудования было принято решение использовать исключительно метод САИ при использовании линейной и матричной решеток в целях акустической идентификации.

Известно, что расположение элементов матричной решетки может быть оптимизированно для достижения требуемой чувствительности и разрешающей способности. При использовании матричных решеток применен метод эффективной апертуры для оптимизации распределения элементов. Эффективная апертура решетки представляет собой эквивалентную апертуру, которая способна создать сигнал, эквивалентный сигналу, полученному от точечного источника.

Эффективная апертура рассчитана (2):

$$e_N = \sum_{m=1}^N w_R w_T(m)$$
, где $w_R = [1,1,...,1], w_T(m) = [0,0,...,i_m,...,0]$ и $i_m = 1$, (2)

где w_R и w_T – взвешивающие коэффициенты элементов апертуры приемника и излучателя соответственно [61].

Использованная модель эффективной апертуры позволяет применять математические методы оптимизации решеток. Эффективная апертура также позволит использовать способ миграции данных, полученных методом САИ, что является одной из новейших разработок в области применения технологии ФАР, описанных в разделе 1.4.

Для способа миграции реализации данных применяется модифицированный метод миграции Кирхгофа [62], в котором учитываются поверхностно-ориентированные координаты. Согласно данному методу волновое поле в определенной точке в определенный момент времени (x, y, z, t) является совокупностью распространения волн от других точек в предшествующий момент времени. Применение подобного метода обработки сигнала влечет за собой возникновение артефактов в результате суммирования сигнала, в особенности при ограниченной апертуре решетки и малом количестве ее элементов. Решением этой проблемы является ввод оператора G, который обеспечивает согласованность вычисленного радиочастотного сигнала C(t) (3).

$$C(t) = G(\Phi a a (A_i(t - t_i))) \times \sum_i w_i A м плитуда (A_i(t - t_i)),$$
 (3)

где w_i – вес, определенный для радиочастотного сигнала A_i(t) от i-го элемента; t_i – время задержки для i-го элемента [62-63].

В идеально сфокусированном состоянии все значения $w_i A_i (t - t_i)$ должны совпадать по фазе. Это условие используется для исключения или удаления артефактов, возникающих при обработке сигнала, вызванного ограниченной шириной пропускания ультразвукового сигнала. Различные параметры, такие как отклонение, энтропия и др., могут вносить положительный вклад в данное фазовое согласование [64]. При обеспечении достаточной зоны покрытия и наличии инвертированных импульсов, отклонение среднеквадратичное сигнала также повышает уровень согласования фаз. В теории данное условие ведет к идеальному согласованию фазы, но на практике это не представляется достижимым ввиду наличия стохастических погрешностей И требует введения дополнительного ограничения на ширину полосы пропускания сигнала. В общем случае ужесточение требований к акустическим сигналам позволяет достичь лучшего разрешения, но вместе с тем ведет к снижению чувствительности контроля ввиду сжатия и без того слабовыраженных деталей изображения, а также увеличению уровня боковых лепестков диаграммы направленности точечно распределенной функции [62].

Вычисление функции G показывает отклонение C(t) и зависит от фазового распределения w_i(t - t_i). При рассмотрении идеального точечного отражателя фаза сигнала должна быть одинакова для всех элементов для возможности масштабирования преобразователя. В обратном случае требуется определение порогового значения фазы сигнала на основе статистического параметра. Подобный подход справедлив для всех рассмотренных случаев, в отличие от использования взвешивающего коэффициента (W_i) [62-64]. Идеальное распределение интенсивности позволяет выделять артефакты и осуществлять их фильтрацию. Предлагаемый метод предполагает возможность его реализации в режиме реального времени в ходе проведения контроля, благодаря оптимизации алгоритмов для произведения многопоточных параллельных вычислений.

На рисунке 2.5 показаны секторные развертки контроля образца с пятью сквозными отверстиями на различной глубине, демонстрирующие результат различного уровня фазового согласования.



Рисунок 2.5 – Применения фазового согласования сигнала в обработке результатов контроля: а) простая миграция; б) слабое фазовое согласование; в) сильное фазовое согласование

2.1.1.1 Улучшение соотношения сигнал/шум в полученном акустическом сигнале

Реконструкция изображений из А-разверток является обратной задачей, не имеющей прямого решения. Прямой алгоритм должен аппроксимировать полученное решение, что ведет к появлению артефактов реконструкции и увеличению уровня гранулированного шума (зернистости). Причиной этому являются конечные размеры апертуры решеток, нарушение условий теоремы Котельникова применяемая ширина полосы пропускания И сигнала. Гранулированный шум является распространённой проблемой всех когерентных способов визуализации, в т. ч. и ультразвуковой, где он определяется в основном интерференцией возвращающейся волны в границах апертуры датчика. В пределах каждой растровой ячейки некое число

элементарных отражателей отражает падающую акустическую волну падения принимающей апертуры преобразователя. Отраженные В сторону когерентные произвольно вызывают конструктивную волны или деструктивную интерференцию в зависимости от фазы. Таким образом, полученное изображение искажается случайным распределением направления зерен, называемым гранулированным шумом.

Изображение с гранулированным шумом определяется следующим образом [65] (4):

$$v_1 = f_1 \,\vartheta, \tag{4}$$

где $f = \{f_1, f_2, f_3 \dots f_n\}$ – идеальное изображение без шумов; $V = \{v_1, v_2, v_3 \dots v_n\}$ – гранулированным шум; $\vartheta = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3 \dots \vartheta_n\}$ – произвольное поле.

Фильтрация от гранулированного шума является главным этапом предварительной обработки сигнала для корректной визуализации отражателя и выделения уникальных идентификационных признаков.

Природа возникновения реконструированного гранулированного шума определяет важность применения технологий фильтрации статистической фазы сигнала. Подходящим методом для удаления гранулированного шума является такой метод, который увеличивает отношение сигнал/шум с минимальными потерями в чувствительности. Дополнительным критерием является время, требуемое для обработки сигнала. Поскольку уменьшение гранулированного шума является распространенной проблемой ДЛЯ когерентных систем визуализации в медицине, САП, а также в других областях, существует множество специальных методик, устраняющих подобный шум [62]. При этом существует отличие в фильтрации сигнала для задач неразрушающего контроля. Это обусловлено особенностями материала. Например, конструкционные стали атомной энергетики являются мелкозернистыми, что ведет к отсутствию ярко выраженных отражателей, и большинство из них распределены систематично по всей площади реконструированного изображения. Шум, вызванный рассеянием на границах зерен, имеет более низкую амплитуду сигнала, чем полученный от дефектов или особенностей геометрии объекта контроля сигнал. Высокий градиент между амплитудами сигналов приводит к возникновению специфических трудностей в фильтрации шума в основном из-за того, что гранулированный шум зависит от акустического сигнала и схож с мультипликативным шумом.

Другим видом шума является электрический, в основном вызванный предусилителем принимающих каналов. Электрический шум – это тип флуктационных помех (эффекта Шотке), подчиняющихся распределению Пуассона [65-67]. Сравнивая ФАР и миграционные решетки, можно отметить, что в последних электрический шум напрямую связан с количеством принимающих каналов.

Помимо задач подавления шума стоит отметить существование систематических сигналов, вызванных остаточным акустическим или электрическим сигналом, способным создать нежелательные импульсы соседних элементов ревибрационными и электрическими эффектами преобразователей с наклонными призмами.

Измерительные погрешности также вносят свой вклад в результат реконструкции. Например, неровная поверхность объекта контроля ведет к неправильному определению позиции элементов решетки, влечет за собой ошибки в определении соотношения фаз сигнала. Поэтому разработанная в рамках данной диссертационной работы модель формирования УИП включает в себя модули уменьшения шума, которые используются на различных этапах, начиная с обработки отдельной А-развертки и заканчивая этапом оценки изображения [68].

Разработанные фильтры позволяют снизить влияние различных типов шума (электрический и акустические шумы, артефакты реконструкции). Остаточный шум ограничивает чувствительность контроля, которая в идеальном случае должна быть достаточной для визуализации сигналов, полученных от зерен контролируемого металла.

45

Каждая из полученных А-разверток $A_{i,j}$ (t), где i = 1, n (элементы излучателя), j = 1, m (элементы приемника), искажается электрическим шумом, возникающем на предусилителе. Наиболее эффективный способ борьбы с помехами такого рода – выбор предусилителя с низким уровнем собственного электрического шума. Данный шум подчиняется распределению Пуассона, но при этом по своим характеристикам близок к распределению Гаусса. Распределение Пуассона характеризует увеличение шума с ростом амплитуды [69]. Фильтрация подобных помех, ухудшающих качество реконструируемого изображения, ведет к уменьшению чувствительности при поиске слабовыраженных отражателей, что требуется для сравнения уникальных идентификационных признаков.

В случае повышенного электрического шума был применен способ его уменьшения с использованием набора А-разверток – усреднение сигнала, который заключается в построении результирующей средней А-развертки на основе 3 – 5 измерений в одной позиции.

На практике было обнаружено, что для большинства современных однои многоэлементных преобразователей фильтрация подобных разверток не требовалась. Вместо этого фильтрация применялась на этапе реконструкции посредством статистического алгоритма миграции, а также в постобработке с помощью фильтра сглаживания по Гауссу.

Статистические методы для подавления шума имеют как преимущества, так и некоторые недостатки в сравнении с аналитическими методами [69]. Одним из таких недостатков является сложность применяемой модели, ведущая к усложнению архитектуры ПО и увеличению необходимого времени обработки. В целом для данного типа методов вероятность возникновения систематической ошибки ниже, нежели в аналитических подходах, что приводит к улучшению точности реконструкции. Также статистический алгоритм позволяет применять нестандартный вид визуализации с неравномерным снятием сигналов и при отсутствии полной информации о реконструируемом объеме. Подобное преимущество позволяет осуществлять визуализацию данных, полученных разряженными решетками.

Статистический Алгоритм Миграции (САМ) использует статистические соотношения между полученными А-развертками. Данный алгоритм выделяет области, в которых отдельный элемент А-развертки является когерентным с элементами в этой же позиции на других А-развертках, и скрывает те области, в которых такой связи нет. Такой процесс создает чистое изображение, которое может быть использовано в качестве входных данных для дальнейшего процесса обработки [62]. Данный алгоритм позволяет отображать те точки изображения, где А-сканы, полученные с помощью отдельных элементов решетки, совпадают. Если этого не происходит, то алгоритм позволяет скрывать подобные области контроля. Принимая во внимания важность значения амплитуд А-развертки для задачи формирования УИП, стоит отметить, что методика САМ не влияет на результирующие амплитуды реконструированном изображении, построенном В ПО фильтрованным данным [70]. Данный алгоритм нацелен на фильтрацию незначительного расхождения сигналов, вызванного недостаточным качеством состояния поверхности контролируемого объекта, недостаточным собственной вибрацией акустическим контактом, пьезокерамической пластины и т. д.

Сохранение информации об амплитуде достигается посредством реконструкции двух изображений: амплитудного и фазового. Все последующие этапы обработки и фильтрации изображения справедливы для фазового изображения, которое в конечном итоге выступит в роли бинарного медианного фильтра. Такой подход позволяет удалить все нежелательный шумы с амплитудного изображения посредством бинарного фильтра без оказания непосредственного влияния на значения амплитуд.

Методика вычисляет значение амплитуды М, необходимое для построения изображения, суммируя квадрат значения амплитуды A_i i-го канала для каждой точки плоскости/объема изображения согласно таблице

поиска, и вычисляет среднюю M_k (5). Квадратичные значения позволяют избежать отрицательных значений.

$$S_{k} = \sum_{i=1}^{N} A_{i}^{2} , M_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_{i}}{N} , \qquad (5)$$

где N – количество вносящих вклад значений А-развертки [71]. Далее вычисляется дисперсионное изображение V (6):

$$V_k = \frac{(S_k/N - M_k)}{M_k} \tag{6}$$

где V_k – дисперсия от точки k; S_k – сумма квадратов амплитуд; M_k – среднее значение амплитуд [71].

В идеальном когерентном состоянии V_k=0. Для распределения Пуассона (флуктационный шум) отклонение равняется среднему значению.

Полученное V инвертируется и проверяется на соответствие граничным условиям:

$$\begin{cases} W_k = 1 \operatorname{пр} \frac{1}{V_k} > \operatorname{порог}, \\ W_k = 0 \operatorname{пp} \frac{1}{V_k} \le \operatorname{порог}. \end{cases}$$
(7)

W_k создает маску, значения которой являются весовым коэффициентом в точке 'k' [71]. При W_k=0 отдельные амплитуды показывают высокую дисперсию, что указывает на неточную попиксельную реконструкцию. Если W_k=1, амплитуды показывают высокую степень согласования и, соответственно меньший шум.

На рисунке 2.6 показан результат использования маски с различным порогом. Можно заметить, что более высокие ограничения порога дисперсии создают практически бинарно сегментированное изображение, что положительно влияет на соотношение сигнал/шум. Взвешивающая матрица, применяемая для построения амплитудного изображения, позволяет проводить фильтрацию данных и отбирать верные амплитудные значения.





Порог дисперсии = 2.0



Порог дисперсии = 5.0

Рисунок 2.1 – Результат порогового ограничения

2.1.1.2 Фильтр сглаживания по Гауссу

САМ создает искаженные отображения индикаций при реконструкции. Это происходит благодаря незначительным изменениям в распределении сигнала между близлежащими точками, которые вносят вклад в реконструкцию. В работе разработана методика сглаживания изображений (МСИ), корректирующая внесенные изменения. МСИ состоит из стандартного фильтра сглаживания по Гауссу с последующим применением бинарной медианы в отношении амплитудного изображения. Процесс сглаживания является последним шагом, выполняемым в данной стадии.

Когерентные индикации состоят из нескольких точек в реконструированном изображении. Накладывая элементарные граничные условия, как было описано выше, данные о рядом стоящих элементах обрабатываются не полностью. Решение по фильтрации каждой точки принимается без учета решения принятого для соседних точек. Это приводит к появлению ошибочных индикаций, в т. ч. разрывов в изображении отражателей.

После применения сглаживания по Гауссу дисперсионного изображения с малым ядром фильтра (обычно матрицы с размерностью 3 или 5) разрывы заполняются и за счет этого достигается сглаженность реконструированного изображения.

Оператор сглаживания по Гауссу – двумерный оператор свертки, который используется для размытия изображения, что в равной степени удаляет как мелкие детали, так и шум [72]. В данном контексте процесс аналогичен фильтру усреднения, но здесь используется другое ядро, которое представляет вид распределения по Гауссу (8):

$$Y(t) = K * X(t) = \int K(t-s)X(s)ds,$$
(8)

где К – ядро интеграла; Х – входное значение; Ү – выходное [72].

Сглаживание данных свертки получается от степени гладкости применяемого ядра. Ядро К зависит от диапазона σ, который определяет распределение значений.

Одномерное ядро (9)

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{t^2}{2}}$$
(9)

может быть определено диапазоном (10):

$$K_{\sigma}(t) = \frac{1}{\sigma} K(t/\sigma), \qquad (10)$$

где $K_{\sigma}(t)$ – плотность нормального распределения с нулевым средним и квадратичного отклонения σ^2 . п-мерное сглаживание данных по Гауссу может быть применено использованием одномерного сглаживания n раз в каждом направлении [72].

Реконструированные ультразвуковые изображения подвержены появлению артефактов как от реконструкции как таковой, так и ввиду недостаточной частоты дискретизации. Фильтр сглаживания по Гауссу устраняет подобные искажения (рис. 2.7). Стандартные процедуры предписывают применять сглаживание по Гауссу до статистического устранения шума для наращивания статистических объемов. Фильтр выдает средневзвешенное значение для всех соседствующих точек, с максимальным средним весом для центральных точек.

Размытие по Гауссу имеет два важных аспекта. Во-первых, смежные точки объединяются для формирования уникального идентификационного признака, а во-вторых, формируется низкопропускной эффект фильтрации, что выступает в роли простейшего шумового фильтра [72-73]. Данный фильтр предпочтителен ввиду своей универсальности и высокой скорости работы.



Рисунок 2.2 – Результат сглаживания по Гауссу: а) первичная реконструкция; б) поврежденные сигналы; в) результат сглаживания по Гауссу.

Описанная выше разработка алгоритмов фильтрации нацелена на получение высокой чувствительности, необходимой для акустической идентификации в отсутствие необходимых высокоамплитудных индикаций и высокого разрешения для объективной оценки отражателей.

2.1.2 Формирование массива уникальных идентификационных признаков

Стадия формирования массива УИП представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Стадия формирования массива УИП

52

Стадия бинаризацию делится на лва шага: сегментацию И реконструированного изображения. Реконструированные изображения чаще всего содержат большое количество однородного акустического шума. Шаг сегментации изображения позволяет выделить необходимые области интереса. Бинарное определение границ выделяет метки для дальнейшей идентификации без потери чувствительности контроля и позволяет снизить процент погрешности [74-76]. Набор подобных меток и формирует окончательный массив уникальных данных, применяющийся для дальнейшей идентификации.

2.1.2.1 Сегментация

Сегментация изображения – это процесс разделения изображений на множество частей или выделения области интереса – набора пикселей логически сгруппированных вместе и представляющих собой полноценные части изображения. Как правило, область интереса представляет собой либо элемент, либо часть элемента на изображении.

Каждая область интереса представляет собой одну индикацию, полученную в результате ультразвукового контроля от таких объектов, как точечные, линейные и пространственные отражатели. Точечный отражатель локализует малые неоднородности, линейный локализует вершины трещин, а пространственный – донный сигнал или отражение от поверхности трещины. Дальнейшая обработка областей интереса может включать процедуру оценки их пригодности для формирования уникального массива данных. Пригодность может быть оценена на основе следующих параметров: формы, размера, максимальной амплитуды отраженного сигнала, расположения, ориентации и др. Сегментация изображения происходит на основе выделения участков скопления максимальной амплитуды отраженного сигнала с описанием их контуров плавными геометрическими формами. В результате реконструкции акустических данных создается изображение в цветовых градациях от белого до красного в соответствии уровню отраженного эхо-сигнала (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Цветовая градация амплитуды акустического сигнала

Анализируя рисунок 2.9 в различных цветовых моделях, можно заметить, что наиболее значимая сегментация каналов изображений наблюдается в цветовой модели HSV, так как цветовые каналы в HSV-изображении легко определяются и не перекрываются друг с другом, в отличие от цветовой модели RGB [77].

В цветовом пространстве модели HSV (Hue, Saturation, Value) (рис. 2.10) используется цилиндрическая система координат, а множество допустимых цветов представляет собой шестигранный конус, поставленный на вершину. Процесс добавления белого цвета к заданному можно представить как уменьшение насыщенности *S*, а процесс добавления чёрного цвета – как уменьшение яркости *V*. Основанию шестигранного конуса соответствует проекция RGB куба вдоль его главной диагонали [78].



Рисунок 2.10 – Цветовое пространство HSV-модели

В рамках данной работы будет осуществляться отсев областей интереса меньше определенного размера (измеряется по количеству пикселей – менее 30 % от максимальной площади элемента с амплитудой выше 70 %) и находящихся близко к границе изображения (10 % от параметра длины и ширины изображения), так как данные области интереса зачастую искажены и вносят большую погрешность в процесс дальнейшей идентификации. Также на этапе сегментации происходит удаление нежелательных статических индикаций – донного сигнала и мертвой зоны на входе акустического сигнала в материал. На рисунке 2.11 изображен результат сегментирования изображения.



Рисунок 2.11 – Сегментация изображения: а) акустическое изображение до сегментации; б) акустическое изображение после сегментации

2.1.2.2 Бинарное определение границы

Операция порогового разделения, которая в результате дает бинарное изображение, называется бинарным определением границы. Целью операции бинаризации является радикальное уменьшение количества информации, содержащейся на изображении, и переход от сравнения амплитуды сигналов к местоположения акустических отражателей. Негомогенный сравнению акустического изображения характер после сегментации позволяет оптимизировать процесс идентификации В результате применения бинаризации.

В процессе бинаризации исходное полутоновое изображение, имеющее некое количество уровней яркости, преобразуется в изображение, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1.

Бинарное определение границы происходит следующим образом:

Каждый пиксель в исходном изображении f(x, y) необходимо заменить на f'(x, y) таким образом (11) [77], что:

$$f'(x, y) = 1$$
, где $f(x, y) \ge T$,
 $f'(x, y) = 0$, где $f(x, y) < T$. (11)

Основные функции при построении порогового изображения можно проиллюстрировать следующим образом: данный процесс – это последовательное вырезание из конуса цветовой модели HSV сегментов, находящихся внутри диапазона, задаваемого значениями Min и Max для каждого канала. В результате этих операций получаем конечный сегмент части нашей цветовой модели, который содержит все цветовые оттенки, принадлежащие объекту слежения.

Следующим шагом является замена всех пикселей в матрице исходного изображения на 0 и 1 согласно приведенному алгоритму (11). В результате пороговой бинаризации мы получаем пороговое изображение (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Результат бинарного определения границы области интереса: а) обработанное изображение; б) выделенные отметки

Рисунок 2.12, а показывает обработанный сектор отсканированного изображения с выделенной областью интереса. На рисунке 2.12, б отражен результат применения бинарного параметра на областях интереса.

В работе был изучен вопрос применения более продвинутых алгоритмов бинаризации, таких как OTSU или MSER [79-81], но при большей нагрузке на аппаратную часть системы они не предоставляют видимого преимущества с точки зрения повышения точности идентификации.

Таким образом, процесс формирования уникальных идентификационных признаков условно делится на пять основных шагов. (Рис. 2.13)



Рисунок 2.13 – Пошаговое представление этапа формирования массива уникальных идентификационных признаков

Стоит отметить, что данная версия этапа формирования массива уникальных идентификационных признаков в полной мере реализуема лишь матричного преобразователя, посредством применения позволяющего использовать миграционные алгоритмы реконструкции (CAM). Использование одноканального ПЭП и линейной ФАР не предполагает возможности применения статистических алгоритмов ввиду отсутствия пространственного набора А-разверток. Более того, в случае использования ПЭП уникальным будет одноэлементного признаком являться непосредственно А-развертка, что исключает возможность применения фильтра сглаживания. А-развертка бинарна по своей природе, следовательно, шаг бинаризации также исключается из этапа формирования УИП в случае применения ПЭП. Оптимизированное представление одноканального процесса представлено на рис. 2.14.

58



Рисунок 2.14 – Оптимизированная модель формирования УИП: а) одноканальный ПЭП; б) линейная ФАР

2.1.3 Определение степени корреляции массива уникальных идентификационных признаков

Как было упомянуто в п. 2.1, вторым этапом разработанной модели является корреляционное сравнение полученных на первом этапе УИП. Сравнение уникальных признаков это процедура установления соответствия между эталонным УИП и УИП, сформированным в результате повторного измерения. Согласно п. 1.3 при сравнении отпечатков пальца применяется корреляционное сравнение. Метод сравнения корреляций является довольно сложным в биометрии из-за сложности реализации и продолжительного времени действия алгоритма, но в рамках идентификации уникальных внутреннеприсущих признаков для сравнения корреляций бинарных изображений достаточно эффективен. Корреляционный метод сравнения относится к классу "гистограммных методов сравнения", который включает в себя 4 основных алгоритма (рис. 2.15).



Рисунок 2.15 – Этап сравнения УИП

Представленные методики широко используются для анализа и сравнения изображений и не требуют громоздких расчётов, что позволяет достичь высокой скорости сравнения изображений.

В основе данных методов лежит принцип расчёта разницы между определенным показателем. Т. к. сравниваться будет массив уникальных данных, полученный из структуры сварных швов, такими показателями будут являться положение и форма элементов изображения.

2.1.3.1 Описание алгоритмов корреляционного сравнения

а) Корреляция

При расчете коэффициента корреляции, или разницы между двумя величинами необходимо, четко определить значения величин. При расчете корреляции каждый пиксель изображения оценивается по положению и форме, ему присваивается числовое значение.

При вычислении коэффициента корреляции сравниваются гистограммы двух изображений [82]. Гистограммой называется графическое представление функции распределения случайных величин в пределах массива данных.

60

К примеру, имеем матрицу изображения 1 размером MxN, элементами которой являются числа от а до b. Тогда в гистограмме H1 (которая является массивом) размером 255 i-элемент есть частота появления числа i в матрице.

Допустим, имеем матрицу размером 2x3 со значениями элементов от 1 до 3:

Цифра 1 в (12) встречается 2 раза, 2 – 3 раза, 3 – 1 раз, следовательно, значение гистограммы H1=2 3 1, на основании чего мы можем построить графическое представление гистограммы (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Гистограмма Н1 для матрицы 2х3

Размер матрицы для построения гистограммы изображения определяется значением количества пикселей изображения (13, 14).

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_{I} (H_1(I) - \overline{H_1}) * (H_2(I) - \overline{H_2})}{\sqrt{\sum_{I} (H_1(I) - \overline{H_1})^2 * \sum_{I} (H_2(I) - \overline{H_2})^2}},$$
(13)

где H_1, H_2 – гистограммы 1-го и 2-го изображения соответственно; d (H_1, H_2) – разница между значениями гистограмм двух изображений; I – индекс элемента, $\overline{H_1}, \overline{H_2}$ – средние арифметические значения гистограмм H_1 и H_2 соответственно.

$$\overline{H}_k = \frac{1}{N} \sum_J H_k(J) , \qquad (14)$$

где k – номер k-го изображения; N – общее количество элементов в гистограмме (N=255); J – индекс элемента.

Значения корреляции изменяются в интервале [-1, 1], для нормализации корреляции и перевода результатов вычисления в проценты используется формула (15):

$$C_{\text{HOPM}} = \frac{C_p + 1}{2},\tag{15}$$

где С_р – расчетная корреляция.

б) Пересечение (интерсекция)

Пересечение определяется согласно формуле (16):

$$d(H_1, H_2) = \sum_{I} \min (H_1(I), H_2(I)).$$
(16)

Значения H_1 , H_2 рассчитываются аналогично корреляционному сравнению. Для нормализации значения пересечения, которое изменяется в интервале [0:N] (при этом чем больше значение, тем больше одно изображение похоже на другое), необходимо рассчитать значение пересечения для первого изображения с самим собой. Тогда нормализация производится по формуле (17):

$$\Pi_{\rm HOPM} = \frac{\Pi_{\rm p}^{12}}{\Pi_{\rm p}^{11}},\tag{17}$$

где Π_p^{12} – рассчитанный коэффициент пересечения между 1-м и 2-м изображением; Π_p^{11} – рассчитанный коэффициент пересечения между 1-м изображением и самим собой.

в) Хи-квадрат

Хи-квадрат рассчитывается согласно формуле (18).

$$d(H_1, H_2) = \sum_{I} \frac{(H_I(I) - H_2(I))^2}{H_1(I)}.$$
(18)

Для нормализации значения Хи-квадрат, которое изменяется в интервале [0:N] (при этом чем меньше значение, тем больше одно

$$X_{HOPM} = 1 - \frac{min(X_p, 20)}{20},$$
(19)

где X_p – значение, полученное в результате сравнения гистограмм изображений.

г) Расстояние Хеллингера (Бхаттачарайя)

Расстояние Хеллингера ищется с помощью формулы (20):

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{H_1 H_2 N^2}}} \sum_{l} \sqrt{H_1(l) * H_2(l)}, \qquad (20)$$

где значения H_1 , H_2 , $\overline{H_1}$, $\overline{H_2}$ рассчитываются аналогично вышеупомянутому способу.

Для нормализации значения расстояния Хеллингера, которое изменяется в интервале [0:1] (при этом чем меньше значение, тем больше одно изображение похоже на другое), используется следующая формула (21):

$$B_{\rm HOPM} = 1 - B_{\rm p},\tag{21}$$

где В_р – значение, полученное в результате сравнения гистограмм изображений [83].

2.1.3.2 Программная реализация процедуры

Для выполнения задачи сравнения УИП в целях однозначной идентификации учетных единиц было создано программное обеспечение для сравнения изображений, основой работы которой являются гистограммные методы сравнения изображений.

Программное обеспечение основано на Qt/QML 5.3.1 и OpenCV 2.3.1. Блок-схема, описывающая принцип действия программы, представлена на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Блок-схема программы для сравнения УИП

64

Программное обеспечение реализовано на языке QML (Qt Meta-Object Language) – декларативный язык программирования, основанный на JavaScript, предназначенный для дизайна приложений, делающих основной упор на пользовательский интерфейс. Является частью Qt Quick, среды разработки пользовательского интерфейса.

Сама работа в Qt/QML основана на паттерне MVC (Model-View-Controller), которая подразумевает разделение программы на 3 отдельные части: Данные (Модель), Пользовательский Интерфейс (Отображение) и Управление (Контроллер). При этом графическая часть (Отображение) в большинстве случаев формируется на специальном QML-языке, основанном на JavaScript. Остальные части программы формируются на языке C++.

Рассмотрим все 3 части на примере разработанной программы:

a) Отображение (View)

Отображением в данной программе выступает QML программа main.qml. Здесь присутствует вся разметка элементов интерфейса, включая предупреждения об ошибках. Также в этом модуле обеспечивается подключение слотов и сигналов, что фактически означает настройку связи между частями программы. Некоторый функционал ради удобства вынесен в отдельные части:

– SelfOpenImage.qml – элемент, обеспечивающий отображение выбранного пользователем изображения, а также диалог выбора изображения;

– NumProgressBar.qml – элемент, обеспечивающий отображение параметра, рассчитанного в программе, в виде progress bar с цифровым обозначением (и в процентах, и значением параметра) и названием метода;

б) Данные (Model)

Представляются в программе объектом model класса CompareListModel. Именно эту модель использует отображение для формирования вывода.

в) Управление (Controller)

Представляется в программе объектом compare класса Compare. Реализует методы расчета параметров на основе сравнения заданных изображений. В данной версии реализовано 4 метода сравнения изображений, которые будут представлены далее. Также в качестве дополнительного контроллера выступает объект obj класса SaveObject, обеспечивающий сохранение данных в файл.

Для расчета гистограмм и их сравнения используются функции OpenCV. Для чтения входного изображения используется функция

cv::Mat imread(const string& filepath, int flags=1)

Перед расчетом гистограмм второе изображение нормируется по размеру с помощью функции

void resize(InputArray src, OutputArray dst, Size dsize, double fx=0, double fy=0, int interpolation=INTER_LINEAR)

Имеем для сравнения два изображения в виде двух матриц одинакового размера типа float (число с плавающей точкой одинарной точности). Построение по каждой из них гистограмм производится с помощью функции OpenCV:

void calcHist(const Mat* images, int nimages, const int* channels, InputArray mask, OutputArray hist, int dims, const int* histSize, const float** ranges, bool uniform=true, bool accumulate=false)

Методы сравнения гистограмм требуют, чтобы гистограммы были нормализованы. Нормализация реализуется с использованием функции OpenCV:

void normalize(InputArray src, OutputArray dst, double alpha=1, double beta=0, int norm_type=NORM_L2, int dtype=-1, InputArray mask=noArray())

Для расчета разницы между гистограммами используется функция OpenCV:

double compareHist(InputArray H1, InputArray H2, int method)

В качестве методов в функции реализовано:

- CV_COMP_CORREL корреляция;
- CV_COMP_CHISQR хи-квадрат;
- CV_COMP_INTERSECT пересечение;

- **СV СОМР ВНАТТАСНАКУУА** — расстояние Хеллингера.

2.2 Оптимизация распределения элементов многоэлементного преобразователя

Как было упомянуто в п. 2.1.3.2, разработанная модель в полной мере реализуется лишь посредством применения алгоритма САМ с использованием матричных решеток, но, как было выяснено в ходе обзора литературы (п. 1.4.), на данный момент отсутствуют коммерчески доступные матричные решетки с большой апертурой, которая бы позволила реализовать алгоритм миграции данных. Матричная антенная решетка с большой апертурой содержит значительное количество элементов в соответствии с теоремой Котельникова. Для больших объемов реконструкции количество элементов может превышать тысячи, что приводит к серьезным проблемам при распайке кабелей. Поэтому был сконструирован преобразователь с разреженной апертурой.

В настоящее время существуют инструменты моделирования для точной оценки параметров преобразователей с учетом специфических условий контроля (качество поверхности, геометрия поверхности и доступ), состояния материала (коэффициента ослабления, изотропность) и наличия дефектов (их тип и положение). В качестве наиболее подходящего для проектирования преобразователей рассматриваемого типа был выбран метод моделирования распространения упругих волн [84].

Принципы проектирования двумерных решеток с разреженными апертурами были рассмотрены для преобразователей ФАР [85-86]. Получение данных разреженными решетками не подчиняется теореме Котельникова. В зависимости от расположения элементов решетки полученные изображения содержат артефакты, появляющиеся при реконструкции. Выбор оптимального расположения элементов и фильтрация сигнала позволит уменьшить возникающие артефакты.

Существует два правила распределения для разреженных апертур:

а) Случайное распределение

Случайное, или спиральное, распределение дает наилучшие результаты с точки зрения подавления артефактов, т. к. появляющиеся дифракционные помехи усредняются и пропадают. Но стоит отметить, что таким образом могут быть подавлены и небольшие детали изображения, что может спровоцировать недостаточность данных при повторном измерении УИП. Элементы спирали вычисляются с помощью следующей формулы (22):

$$\begin{cases} \theta_n = \theta_{n-1} + \Delta \theta, r_n = r_{n-1} + \Delta r \\ x_n = r_n * \cos(\theta_n), y_n = r_n * \sin(\theta_n) \end{cases}$$
(22)

Каждый поворот элемента спирального распределения $\Delta\theta$ является нерациональным углом (а именно золотое сечение или 0.618°, или 137.5°), числом, которое обеспечивает отсутствие скопления сигналов в произвольном единичном направлении или в произвольном местоположении [87]. Приращение радиуса каждого элемента Δr вычисляется в соответствии с необходимым диаметром датчика.

б) Центрирование элементов

наиболее Элементы решетки плотно распределены В центре разреженной. Концентрация элементов вокруг центра решетки допускает большее число решетки, элементов что улучшает качество реконструированного изображения.

Широкая апертура преобразователя традиционно ограничивает область его применения до контроля плоских поверхностей. Наряду с этим собственные паразитные вибрации пьезокерамической пластины приводят к ухудшению соотношения сигнал/шум. Для целей ультразвуковой идентификации к проектируемому преобразователю выдвигаются следующие требования:

 наличие широкополосного сигнала, требуемого для реализации алгоритма миграции акустических данных и достижения высокого разрешения;

- размер апертуры элемента, равный длине элементарной волны, что является оптимальным параметром для достижения высокого разрешения;
- распределение элементов решетки спиральное; апертура решетки ограничена диаметром в 20 мм для возможности криволинейных поверхностей;
- центральный элемент выступают в роли передатчика, остальные приемники (подобная схема позволяет оптимизировать включение всех элементов в электрической цепи с целью повышения чувствительности датчика);
- преобразователь устанавливается на призму и его верхний слой согласуется с параметрами акустической призмы для повышения чувствительности.

Применяется стандартная формула ДЛЯ определения величины перекрытия между ближайшими элементами 32-элементной конструкции преобразователя с целью получения минимального расстояния, на котором присутствует эффективное покрытие акустического поля [73, 87]. Элемент с апертурой в одну длину волны испускает акустическую волну с углом раскрыва в 23° в призме из оргстекла. При применении призмы с углом наклона в 60° и учитывая стандартную скорость стали (5920 м/с), угол раскрытия акустического фронта достигает примерно 90° после преломления волны. Таким образом, максимальное покрытие всех элементов решетки проявляется практически в момент попадания сигнала в образец. Схема показана на рис. 2.18. В радиальном направлении вся область от -180° до +180° покрывается практически полностью. Ограничения вносятся лишь геометрией призмы.



Рисунок 2.18 – Оценка покрытия сигнала

Использование внешней наклонной призмы позволяет направлять акустическое поле в требуемую зону, а также использовать поперечные волны, которые существенно более чувствительны к мелким отражателям, формирующим внутреннюю структуру сварного соединения. Более того, когда контролируемая область сварных изделий не может быть просканирована через валик усиления, применение наклонной призмы – единственная возможность осуществить процедуру контроля сварного соединения. При помещении преобразователя на наклонную призму, которая направляет акустическое поле на корневую часть шва посредством преломления, система УЗК позволяет визуализировать весь объем шва, в том числе область корня шва. Стоит отметить, что геометрия конического акустического поля будет претерпевать изменения ввиду преломления в призме. Например, конус в сечении будет иметь овал вместо традиционного круга. В связи с этим параметры наклонного преобразователя должны быть проверены на тестовых образцах и/или смоделированы.

Принципы упругодинамического моделирования различных уровней сложностей стали стандартными для решения задач неразрушающего контроля. Для оценки проектируемой конструкции преобразователя рассматривается геометрия точечных отражателей как наиболее оптимальная определения базовых параметров, распределение ДЛЯ таких как чувствительности, область покрытия и возможность появления артефактов реконструкции. Взаимодействие точечного источника с акустической волной может быть смоделировано электродинамическим принципом трассировки лучей [88].

На рис. 2.19 и 2.20 показаны два теоретических распределения апертур, основанные на тестируемом спиральном расположении элемента. В обоих случаях передающий элемент размещен в центре решетки.



X	Y	X	Y
0	0	4,49	3,78
-7,18	6,58	-5,61	0,23
0,83	-9,45	3,8	-3,78
5,61	7,32	-0,24	5,09
-8,83	-1,56	-3,1	-3,71
7,35	-4,67	4,54	0,61
-2,19	8,16	-3,55	2,47
-3,78	-7,27	0,89	-3,97
7,45	2,72	1,89	3,3
-7,1	2,93	-3,38	-1,08
3,14	-6,72	2,99	-1,38
2,14	6,83	-1,17	2,8
-5,97	-3,46	-0,94	-2,61
6,49	-1,43	2,23	1,17
-3,67	5,23	-2,18	0,58
-0,79	-6,08	1,08	-1,68

Рисунок 2.19 – 5 МГц преобразователь: обратная спиральная конструкция

	X	Y	X	Y
10	0	0	-6.38	0.26
8	0.22	-2.51	4.71	-4.69
	1.69	2.20	-0.32	6.90
6	-2.99	-0.53	-4.59	-5.50
	2.78	-1.77	7.35	0.99
2	-0.92	3.43	-6.30	4.39
0	-1.75	-3.38	1.74	-7.74
	3.82	1.39	4.07	7.11
	-4.00	1.65	-8.05	-2.57
-4	1.94	-4.15	7.91	-3.65
	1.45	4.62	-3.46	8.27
	-4.41	-2.56	-3.12	-8.68
-10	5.23	-1.15	8.40	4.41
	-3.23	4.59	-9.42	2.48
	-0.75	-5.82	5.41	-8.41
	4.69	3.95		

Рисунок 2.20 – 5 МГц преобразователь: оптимизированная спиральная конструкция

С целью изготовления матричных преобразователей спиральное распределение было оптимизировано для достижения минимального расстояния между двумя элементами. Минимальное расстояние между 1-м и 2-м элементами составило 2,265 мм и максимальное, между 31-м и 32-м – 18,399 мм.

Чувствительность, определяемая уровнем соотношения сигнал/шум при реконструкции изображения, зависит от расстояния и пространственного расположения отражателей, от геометрии синтетической апертуры решетки и от количества и расположения элементов решетки. Аналогично единичному элементу преобразователя информация о распределении чувствительности важна для подтверждения эффективности использования преобразователя. Соотношение сигнал/шум также зависит от числа сигналов, которые создают

72
реконструированный сигнал, и от зависимости расстояния расхождения пучка и затухания акустической волны.

Проведено моделирование акустического поля со смоделированными точечными отражателями. Апертура решетки А – круглая, ее диаметр составляет около 18 мм, средняя частота – 5 МГц, ближнее поле решетки в стали равно приблизительно 53 мм, диаметр элемента апертуры 1,2 мм (что равно единице длины волны). Моделирование проведено для стали. Выбрано два варианта расположения передающих элементов: 1) один передающий элемент в центре (обозначен крестом на рисунке 2.21); 2) четыре передающих элемента расположенных в областях, отмеченных на рисунке 2.21 звездами. Результаты реконструкции представлены на рисунке 2.22.



Рисунок 2.21 – 5 Мгц преобразователь: распределение излучающих элементов



Рисунок 2.22 – Численное моделирование акустического поля матричной решетки: а) один центральный элемент передающий без фильтрации; б) фильтрация; в) четыре элемента передающие без фильтрации; г) фильтрация.

Четыре точечных отражателя располагаются в пределах 25 мм, другие четыре – в 50 мм. Обе группы расположены в 45°, 90°, 195° и 330°. Изображения, полученные одним или четырьмя элементами, одинаковы, за исключением некоторого улучшения реконструированного сигнала в случае, когда 4 элемента выступают в роли излучателей. Колориметрическая шкала всех 4 изображений сопоставима с соответствующей шкалой амплитуд.

Спиралевидное расположение элементов эффективно устраняет помехи; реконструированный сигнал практически гомогенный, даже без применения фильтрации (изображения слева). Фильтрация осуществлена согласно шагам 1–3 этапа формирования УИП в разработанной модели. Контраст и

74

разрешение изображения могут быть улучшены увеличением области сканирования.

На основе данных моделирования утверждена карта расположения элементов датчика согласно обратной спиральной конструкции (рис. 2.23) и его характеристики (табл. 2.1).



Рисунок 2.23 – Расположение элементов преобразователя

Описание датчика	матричная решетка с разряженной
	апертурой и постоянной
	чувствительностью в 360°
Размер корпуса (ДхШхВ, мм)	35 x 28 x 35
Материал корпуса	нерж. сталь, пластик
Держатель	резьбовое соединение М5
Поверхность преобразователя	плоскость
Угол входа акустической волны	0°
Скорость звука в призме	2,740 м/с
Задержка	0,55 мм
Число элементов/ размеры решетки	32/1х1мм
(ДхШ)	
Номинальная центральная частота	5 МГц
Допустимые пределы температуры	10-50°С, без перепадов
Допустимые пределы напряжения	320 В (дельта импульс), 240 В
	(прямоугольный импульс)

Таблица 2.1 – Характеристики преобразователя

2.3 Выводы к главе 2

Проведенное численное моделирование предложенной спиральной конструкции матричного датчика продемонстрировало соответствие получаемых характеристик требованиям, предъявляемым к датчику для целей акустической идентификации. Чувствительность контроля и разрешающая способность находятся на достаточном уровне для обнаружения точечных отражателей в стальных конструкциях. Сигналы, полученные от подобных отражателей, и будут формировать набор экспериментально полученных А-

разверток, который является входными данными для разработанной модели формирования УИП (рис. 2.24).



Рисунок 2.24 – Разработанная модель формирования УИП

Применение принципа разреженности элементов датчика, а также формирование синтетической апертуры позволит использовать статический алгоритм миграции помимо стандартных алгоритмов улучшения соотношения сигнал/шум, который позволяет существенно снизить количество артефактов на изображении, практически добиваясь его бинаризации. Порог фильтрации может быть отрегулирован таким образом, чтобы установить оптимальное соотношение между подавляемым шумом и пропускаемым полезным сигналом. Негативный эффект, внесенный САМ, компенсируется посредством применения фильтра сглаживания по Гауссу, который восстанавливает утраченные части полезных сигналов, создавая целостные изображения отражателей. Стоит отметить, что все полезные в целях акустической идентификации части изображения являются динамическими. Статические индикации, такие как донный сигнал, мертвая приповерхностная зона и гомогенный акустический фон, исключаются из конечного УИП на стадии сегментации изображения. Последующее бинарное определение границы позволяет применить корреляционные алгоритмы сравнения не в отношении интенсивности амплитуды акустического сигнала, а в отношении пространственного расположения и размера отражателей, что является внутреннеприсущей характеристикой зерен металла сварного соединения.

ГЛАВА З МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТА

Апробация предложенной в главе 2 модели осуществляется с помощью серии натурных экспериментов. Эксперименты условно делятся на три этапа согласно используемому акустическому преобразователю: одноэлементный ПЭП, линейная ΦΑΡ и разработанная матричная Целью решетка. исследований было установить степень корреляции между сформированным УИП И вновь измеренными УИП. Также производится эталонным моделирование типичных ошибок контроля, которые могут повлиять на результат процедуры идентификации.

3.1 Описание контролируемых образцов

Для проведения серии экспериментов подготовлено 8 контрольных образцов. Четыре образца были изготовлены самостоятельно для отработки технологии, а оставшиеся изготовлены и переданы ФГУП ФЯО ГХК. Образцы выполнены из стали марки 12X18H10T. Скорость звука в данном материале равна 5740 м/с. Особенные свойства стали позволяют использовать ее в различных областях промышленности. Она применяется в атомной отрасли, в частности для изготовления контейнеров и пеналов для отработавшего ядерного топлива [89-91]. Каждый образец представляет собой две пластины, соединенные с помощью стыкового сварного шва без разделки. Кромки подготовлены механическим способом, перед сваркой кромки и прилегающие к ним поверхности зачищаются от окалины, краски, масла и других поверхностных загрязнений на ширину 20 мм с наружной и 10 мм с внутренней стороны. Поверхность обезжиривается спиртом. Сварное соединение выполняется посредством автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В ходе сварки применяется центрирующее устройство. Отклонение от прямолинейности не должно превышать 0,8 мм на 100 мм. Во время сварки применяются следующие материалы: сварочная

проволка Св 04Х19Н11М3 (Ø 1,2 мм), вольфрамовый электрод ЭВЛ (Ø 2,4 мм), аргон в качестве защитного газа. Дополнительная термическая обработка не проводится [92]. Схема сварного соединения показана на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема сварного соединения экспериментальных образцов: а) конструкция соединения; б) конструктивные элементы шва

Металлу сварных швов свойственны ячеисто-дендритные формы кристаллизации. Подобная форма кристаллизации является внутреннеприсущим признаком материала, обеспечивая множество центров рассеяния акустических волн, что позволяет сформировать УИП.

Рассмотрим более подробно каждый из подготовленных образцов.

а) Образец 1

Образец изготовлен в Томском политехническом университете. Геометрические размеры: длина 100 мм, ширина 100 мм, высота 8 мм. Зазор между пластинами (b) составил 2 мм, средняя ширина валика усиления (e) – 11 мм, средняя высота валика усиления (g) – 2 мм. Корень шва отсутствует. Валик усиления срезан на 40 мм для возможности осуществления контроля вдоль сварного соединения. На валик усиления было нанесено лакокрасочное покрытие для оценки его влияния на результаты контроля. Сварка выполняется аппаратом Miller MaxStar 350700 – 200DX при постоянном токе в 200 А. Образец представлен на рисунке 3.2.



б) Образец 2

в) вид сбоку

Образец изготовлен в Томском политехническом университете. Геометрические размеры: длина 100 мм, ширина 100 мм, высота 10 мм. Зазор между пластинами (b) составил 2 мм, средняя ширина валика усиления (e) – 11 мм, средняя высота валика усиления (g) – 2 мм. Корень шва отсутствует. Валик усиления срезан на 40 мм для возможности осуществления контроля вдоль сварного соединения. В сварном соединении и в основном материале были сделаны плоскодонные отверстия диаметром 3 мм и глубиной 2, 4 и 6 мм с целью проверки чувствительности системы контроля. Сварка выполняется

B)

Рисунок 3.2 – Внешний вид образца 1: а) вид сверху; б) вид снизу;

81

аппаратом Miller MaxStar 350700 – 200DX при постоянном токе в 200 А. Образец представлен на рисунке 3.3.





a)





B)

Рисунок 3.3 – Внешний вид образца 2: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

в) Образец 3

Образец изготовлен в Томском политехническом университете. Геометрические размеры: длина 100 мм, ширина 100 мм, высота 12 мм. Зазор между пластинами (b) составил 2 мм, средняя ширина валика усиления (e) – 11 мм, средняя высота валика усиления (g) – 2 мм. Корень шва отсутствует. Валик усиления срезан на 40 мм для возможности осуществления контроля вдоль сварного соединения. Сварка выполняется аппаратом Miller MaxStar 350700 – 200DX при постоянном токе в 200 А. Образец представлен на рисунке 3.4.





B)

Рисунок 3.4 – Внешний вид образца 3: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

г) Образец 4

Образец изготовлен в Томском политехническом университете. Геометрические размеры: длина 200 мм, ширина 200 мм, высота 10 мм. Зазор между пластинами (b) составил 2 мм, средняя ширина валика усиления (e) – 9 мм, средняя высота валика усиления (g) – 2 мм, средняя высота корня шва (g1) – 2 мм. Сварка выполняется аппаратом Miller MaxStar 350700 – 200DX при постоянном токе в 200 А. Образец представлен на рисунке 3.5.



a)



B)

Рисунок 3.5 – Внешний вид образца 4: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

д) Образец 5

Образец изготовлен в ФГУП ФЯО ГХК и передан для исследований в ТПУ. Образец представляет собой элемент корпуса пенала для сухого хранения ОЯТ. Геометрические размеры: длина 200 мм, ширина 200 мм, высота 4 мм. Зазор между пластинами (b) составил 1 мм, средняя ширина валика усиления (e) – 13 мм, средняя высота валика усиления (g) – 1 мм, средняя высота корня шва (g1) – 2 мм. Поверхность криволинейная, радиус кривизны 645 мм. Образец представлен на рисунке 3.6.



a)





B)

Рисунок 3.6 – Внешний вид образца 5: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

е) Образец 6

Образец изготовлен в ФГУП ФЯО ГХК и передан для исследований в ТПУ. Образец представляет собой элемент обечайки пенала для сухого хранения ОЯТ. Геометрические размеры: длина 200 мм, ширина 200 мм, высота 4 мм. Зазор между пластинами (b) составил 1 мм, средняя ширина

валика усиления (e) – 12 мм, средняя высота валика усиления (g) – 1,5 мм, средняя высота корня шва (g1) – 1,7 мм. Образец представлен на рисунке 3.7.



a)





B)

Рисунок 3.7 – Внешний вид образца 6: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

ж) Образец 7

Образец изготовлен в ФГУП ФЯО ГХК и передан для исследований в ТПУ. Образец представляет собой элемент обечайки пенала для сухого хранения ОЯТ. Геометрические размеры: длина 200 мм, ширина 200 мм, высота 4 мм. Зазор между пластинами (b) составил 1 мм, средняя ширина

валика усиления (e) – 13 мм, средняя высота валика усиления (g) – 1,2 мм, средняя высота корня шва (g1) – 1,4 мм. Образец представлен на рисунке 3.8.











B)

Рисунок 3.8 – Внешний вид образца 7: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку

з) Образец 8

Образец изготовлен в ФГУП ФЯО ГХК и передан для исследований в ТПУ. Образец представляет собой элемент кольца пенала для сухого хранения ОЯТ. Выполнена двусторонняя сварка.

Геометрические размеры: длина 200 мм, ширина 200 мм, высота 4 мм. Средняя ширина верхнего валика усиления – 12 мм, средняя высота верхнего валика усиления – 1 мм, средняя ширина нижнего валика усиления – 12 мм, средняя высота нижнего валика усиления – 0,5 мм. Образец представлен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Внешний вид образца 8: а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку 3.2 Описание измерительного тракта

Эксперименты проводятся на лабораторной многоканальной ультразвуковой системе. Структурная схема представлена на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Структурная схема лабораторной установки для УЗК сварных швов [89]

Основой установки, является блок ультразвуковой электроники OPTUS, производства компании I-Deal Technologies GmbH. Блок представляет собой 128-канальный модуль, реализующий как принципы одноканального, так и методику применения фазированных антенных решёток. Таким образом, данная электроника может применяться для решения широкого круга задач автоматизированного ультразвукового контроля, в т. ч. ультразвуковой идентификации. Блок ультразвуковой электроники OPTUS предназначен для высокоскоростных задач контроля и оснащён оптическим каналом данных с пропускной способностью до 2 ГБит/с, что особенно важно при передаче и обработке большого объема данных от матричного преобразователя. Основные технические характеристики приведены в Приложении А. соответствует требованиям ГОСТ 26266-90 и ЕN-12668-1 «OPTUS» «Неразрушающий контроль – Характеристика и верификация ультразвукового контрольного оборудования. Часть 1: Контрольные устройства».

Управляющий компьютер представляет собой высокопроизводительную систему с интегрированным вычислительным модулем для быстрой реконструкции изображений и оценки результатов контроля. Значимые характеристики приведены в таблице 3.1.

Название составного	Модель/значение
элемента/характеристики	
Чипсет материнской платы	Intel® C602
Процессор	E5-2630v2
Видеоплата	Asus GTX680-DC2-2GD5 NVIDIA
	GTX 680
Тактовая частота	6x2,60 ГГЦ
Размер оперативной памяти	4 Гб
Технология оперативной памяти	DDR3 ECC
Тактирование оперативной памяти	РСЗ 12800 (1600 МГц)
Объём жесткого диска HDD	1 Тб
Тип интерфейса жесткого диска	S-ATA 6.0Гб/с
Блок питания	1120 Вт

Стоит отметить обязательное наличие высокопроизводительного графического адаптера, необходимого для осуществления обработки Обработка акустического В режиме реального времени. сигнала FPGAосуществляется посредством использования возможностей программирования и языка программирования CUDA.

Блок управления манипулятором представляет собой отдельное устройство, интегрированное в систему. Данный блок представляет собой системный модуль, связанный с контрольной механикой посредством кабельных соединений. С помощью него происходит управление осевыми шаговыми сервоприводами манипулятора. Устройство связано посредством интерфейса USB 2.0 с блоком определения координат, который обеспечивает корректную работу электроники и получение данных. Все ультразвуковые данные сохраняются вместе с их местоположением (координатами), что позволяет осуществлять реконструкцию двух- и трёхмерных изображений.

Трехосевой манипулятор представляет собой направляющую конструкцию с двумя шаговыми сервоприводами и одной винтовой осью. Устройство обеспечивает трехмерное позиционирование акустического преобразователя как в отношении перемещения по осям X и Y (электронное управление), так и при погружении по оси Z (ручное управление). Информация об актуальном положении считывается во время процедуры контроля в реальном масштабе времени блоком определения координат и передаётся в блок электроники для дальнейшей обработки и реконструкции изображений.

Лабораторная установка в реальном исполнении представлена на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Лабораторная установка для УЗК

3.3 Методики снятия входных данных для акустической идентификации

В рамках подготовки эксперимента было разработано три методики контроля сварных соединений изготовленных образцов. Каждая методика разрабатывалась на основе промышленных решений контроля качества сварных соединений для выбранных типов акустических трактов.

3.3.1 Одноканальный контактный ручной контроль

Базовый и повсеместно применяемый метод контроля качества сварных соединений – ручной одноканальный ультразвуковой контроль. С целью проведения контроля был выбран стандартный датчик Olympus Panametrics A543S-SM. Частота датчика – 5 МГц, а его апертура – 6 мм. Использование продольной волны, более чувствительной к мелким отражателям, возможно после преодоления первого критического угла ввода акустической волны, что возможно достичь при использовании наклонной призмы. Угол наклона выбранной призмы составляет 70°. Схема распространения звуковой волны в материале представлена на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Схема распространения звуковой волны в материале при использовании ультразвукового датчика наклонного типа

Традиционно контроль одноэлементным преобразователем проводят посредством его ручного перемещения вдоль сварного соединения с

незначительными поворотами для достижения максимального покрытия зоны контроля. Однако данный способ не является состоятельным для задач ультразвуковой идентификации, т. к. является очевидно, что точность совпадения сформированного УИП будет зависеть от точного повторения позиции контроля, что обусловлено малым фронтом акустической волны. В связи с этим для проведения эксперимента на каждом исследуемом образце было выбрано по три позиции контроля. Пример схемы расположения представлен на рисунке 3.13 [93].



Рисунок 3.13 – Схема расположения точек измерения на образце 1

В каждой точке необходимо выполнить 5 измерений для возможности фильтрации А-разверток, как описано в главе 2.

Обеспечение акустического контакта осуществляется посредством помещения связывающей среды между датчиком и исследуемым образцом. В ходе эксперимента в качестве связывающей среды применяется глицерин ввиду большого динамического коэффициента вязкости (1,49 Па·с), что обеспечивает стабильный акустический контакт.

В целях минимизации погрешностей, вызванных статическими индикациями, была выбрана контролируемая «Область интереса» (рис 3.14).



Рисунок 3.14 – Область интереса при исследовании акустических шумов [94]

Область располагается на расстоянии 2 мм до корня шва, отсчетной точкой которого служил донный сигнал. Контроль за расположением «Области интереса» происходил с помощью настройки задержки сигнала в параметрах лабораторной системы.

Дополнительных измерений требует процедура моделирования возможных погрешностей. Проверяются следующие негативно влияющие факторы: 1) плохой акустический контакт – моделируется помещением на пути следования волны акустически непроницаемого тела; 2) ошибка позиционирования по линейным осям; 3) ошибка позиционирования, связанная с поворотом датчика.

3.3.2 Автоматизированной иммерсионный контроль с линейной ФАР

Современные тенденции УЗК ведут к все большему распространению как ручного, так и автоматизированного контроля посредством ФАР. Автоматизация контроля позволяет получить точные данные о положении сканирующей решетки, тем самым делая возможным осуществление реконструкции результатов контроля. Модель обработки данных, разработанная в целях акустической идентификации, максимальным образом

становится эффективной при обработке реконструированных изображений. Поэтому принято решение использовать автоматизированный контроль. Наилучшие показатели реконструкции достигаются при равномерном сканировании с обеспечением постоянного акустического контакта. Одним из применяемых способов является использование иммерсии локальной – контактная среда подается в муфту, куда помещаются преобразователь и таким образом обеспечивается контакт с объектом, или погружной – изготавливается иммерсионная ванна, в которую помещается контактная среда, объект сканирования и акустический преобразователь. Во время отработки технологических решений чаще применяется погружная иммерсия. Это связано с отсутствием коммерчески доступных универсальных муфт, позволяющих сканировать объекты произвольной геометрии.

В качестве линейной ФАР использовался стандартный датчик 5L16-1.0·16-D89-P1 производства Doppler Electronic Technologies Co. Ltd. (рис. 3.15). Решетка содержит 16 элементов, с шагом решетки в 1 мм. Номинальная частота – 5 МГц. Аналогично с одноэлементным преобразователем ФАР помещается на призму с углом наклона в 50°.



Рисунок 3.15 – Линейная ФАР 5L16-1.0·16-D89-P1

Объект контроля сканируется при помощи трехосевого манипулятора. Данные записываются с учётом положения датчика, координаты которого

отслеживаются с помощью блока определения координат. На рис. 3.16 изображена лабораторная установка УЗК с трёхосевым манипулятором, на котором закреплен датчик.



Рисунок 3.16 – Иммерсионная ванна с установленным на манипуляторе линейным преобразователем

С целью набора оптимально количества данных для реконструкции объема сканирования выбрано сканирование вдоль шва по траектории меандр, которая характеризуется двумя основными параметрами. Ss – расстояние между позициями измерения (шаг). Sp – расстояние между линиями измерения (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Схематическое изображение позиций измерения линейной ФАР

Шаг принят равным 1 мм, а расстояние между линиями измерения составило 2 мм. Линейная ФАР устанавливается поперёк сварного соединения. Параметры обусловлены требованиями метода акустической реконструкции Digital Focus Array (DFA) [88-89], на котором основано программное обеспечение данного блока электроники УЗК. При контроле сварных соединений без удаления валика усиления, когда невозможно сканирование при непосредственном контакте с зоной контроля, необходимо выбирать зону сканирования таким образом, чтобы путь по оси сканирования был как минимум в два раза больше толщины стенки объекта контроля и заканчивался непосредственно перед валиком усиления.

Полученные во время сканирования данные используются для двумерной реконструкции секторных разверток в режиме реального времени. Реконструированные развертки пошагово заполняют трёхмерную матрицу, создавая тем самым трёхмерное изображение структуры сварного соединения.

Контроль каждого образца проводится 3 раза для каждой стороны сварного соединения. Уменьшение количества сканирований по сравнению со снятием данных в одной позиции обусловлено большим количеством измеряемых данных за одну процедуру сканирования. В результате этого формируются эталонный и вторичный УИП. Произведены дополнительные измерения в целях определения погрешности контроля: 1) погрешность позиционирования – сдвиг по осям X, Y, Z; 2) погрешность поворота датчика вокруг своей оси.

3.3.3 Контроль матричным преобразователем со спиральным распределением.

Преобразователь изготовлен силами сторонней организации (intelligeNDT, Германия) в соответствии с техническими требованиями, описанными в п. 2.2. Технологии корпусирования и подключения

97

электронных контактов принадлежат компании-производителю. Изготовленный преобразователь представлен на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Внешний вид изготовленного датчика

Конструкция датчика существенно отличается от стандартной ФАР, поэтому после его изготовления требовалось произвести измерение стандартных характеристик акустического преобразователя. Измерения производились с использованием универсального осциллографа Agilent 54622d и стандартного образца V-2 по поверхности с радиусом кривизны 25 мм (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 - калибровочный образец V-2

Результаты определения номинальной частоты и чувствительности элементов матричной решетки представлены на рис 3.20 и рис 3.21 соответственно. Подробные численные характеристики приведены в Приложении Б.



Рисунок 3.20 – Распределение частотного спектра, изготовленного датчика

На рисунке 3.20 видно, что середина частотного спектра измеренного по уровню –3 дБ приходится на 6 МГц, что отличается от номинальной частоты на 1 МГц и должно быть учтено при настройке системы контроля. Относительная ширина частотного спектра составила приблизительно 45 %, что является стандартным показателем для ФАР.

Изучение распределения чувствительности элементов строилось на измерении необходимого усиления сигнала в дБ для достижения амплитудой сигнала от одного и того же отражателя величины, равной 80 % от полной высоты экрана. Экспериментальные результаты представлены на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 – Отклонения чувствительности отдельных элементов от среднего значения

Стоит отметить, что средняя величина усиления составила приблизительно 61 дБ, максимальное отклонение чувствительности лежит в пределах 6 %, что является приемлемым показателем для коммерческих ФАР. Таким образом, разработанный преобразователь успешно протестирован и может быть применен в целях ультразвуковой идентификации.

Основным достоинством матричного спирального преобразователя перед линейной ФАР является возможность обеспечить равномерный охват акустического поля. Более того, в предложенной в главе 2 конструкции угол расхождения волн при входе в объект контроля составляет почти 180°, что позволяет устранить эффекты незначительной ошибки при позиционировании преобразователя. Данные факторы позволяют предложить два способа контроля: контактный ручной контроль в стационарных позициях измерения и линейное автоматизированное сканирование объекта в иммерсионной среде. (Рис 3.22, а, б). На каждом объекте контроля были выбраны три равноудаленные друг от друга позиции измерения. Автоматизированное сканирование проводилось параллельно сварному соединению с максимально возможным приближением преобразователя к кроме сварного шва.



б)

Рисунок 3.22 – Осуществление ультразвуковой идентификации с использованием спирального преобразователя: а) позиции преобразователя при ручном контроле; б) направление сканирования при автоматизации контроля

Измерения при ручном контроле в каждой позиции были повторены 5 раз, каждое автоматизированное линейное сканирование произведено 3 раза, аналогично п.3.3.1 и п.3.3.2. В качестве фактора, вносящего погрешность в результат ультразвуковой идентификации, рассмотрена возможность плохого акустического контакта при ручном контроле. Ошибки позиционирования рассмотрены как для ручного, так и для автоматизированного контроля.

3.4 Процедура проведения ультразвуковой идентификации

Во время проведения серии экспериментов полученные акустические обрабатывались согласно п.2.1.1 и п. 2.1.2. данные Данные были экспортированы в графический файл, содержащий массив УИП. Затем сформированные массивы загружались В разработанное рамках В диссертационной работы программное обеспечение, алгоритм работы которого описан в п. 2.1.3.2.

Главное окно ПО (рис. 3.23) представляет собой две области, позволяющие осуществить загрузку сравниваемых массивов данных, а также индикаторы, отражающие результат корреляционного сравнения по каждому из четырех методов, предложенных в п. 2.1.3.1. После загрузки двух изображений ПО автоматически рассчитывает степень корреляции.



Рисунок 3.23 – Интерфейс программы с открытым окном выбора пути к изображению

Правильность работы реализованных алгоритмов проверяется сравнением двух одинаковых массивов УИП (рис. 3.24). В качестве сравниваемого изображения было выбрано изображение, полученное на образце 8, посредством снятия данных с помощью матричного датчика контактным способом.



Рисунок 3.24 – Сравнение одинаковых изображений

На рисунке 3.24 видно, что при сравнении одинаковых изображений процент схожести изображений для всех четырех методов равен 100 %, что говорит о корректности работы программы. Результаты ультразвуковой идентификации сохраняются в файл. Пример изображен на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 – Результаты ультразвуковой идентификации

При проведении идентификации сварного соединения были выделены следующие возможные варианты взаимного расположения точек измерения данных для каждого из вышеописанных ультразвуковых преобразователей. Варианты взаимного расположение приведены на рисунке 3.26 (а–е).





Рисунок 3.26 – Расположение точек измерения данных для ультразвуковых преобразователей: а) идентичная позиция на одном образце; б) различная позиция на одном образце; в) различные образцы; г) идентичная позиция на одном образце с моделированием плохого акустического контакта; д) идентичная позиция на одном образце с моделированием поворота преобразователя; е) идентичная позиция на одном образце с моделированием сдвига преобразователя

Стоит отметить, что при снятии данных методом линейного сканирования под одинаковой позицией понимается сканирование с одной стороны сварного соединения, а при различной позиции – с разных сторон. Моделирование плохого акустического контакта было выполнено только для контактного метода контроля. Таким образом, выделено 22 возможных варианта пробоотбора, зависящих от выбранного типа преобразователя и

105

взаимного расположения точек снятия данных при проведении идентификации.

3.5 Выводы к главе 3

Апробация предложенной в главе 2 модели производится с использованием трех различных вариантов ультразвуковых преобразователей, в том числе матричного спирального преобразователя. Характеристики данного датчика были дополнительно изучены, так как он не является серийным изделием. Отклонение чувствительности отдельных элементов лежит в пределах 6 %, что является приемлемым показателем и подтверждает целесообразность использования данного преобразователя.

Предложено четыре способа снятия данных: ручной контактный контроль, автоматизированное иммерсионное сканирование линейной ФАР, контактный контроль матричным преобразователем ручной И автоматизированное иммерсионное сканирование матричным преобразователем. Такой выбор методик обусловлен необходимостью сравнить различные применяемые в промышленности методы контроля и адаптировать их к предложенному преобразователю. Методика отработки процедуры проведения идентификации предусматривает сравнение уровня корреляции данных, снятых в одной позиции, но разными измерениями, и уровня корреляции данных, снятых с разных позиций или разных образцов. однозначно установить работоспособность Данный подход позволяет алгоритма, реализованного В разработанном В данной работе ПО ультразвуковой идентификации. Помимо различных позиций пробоотбора были смоделированы факторы, потенциально способные внести погрешность в измеряемый уровень корреляции. В качестве таких факторов выделяются: плохой акустический контакт, сдвиг или поворот преобразователя. Результаты апробации предложенной модели представлены в следующем разделе работы.

ГЛАВА 4 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведено исследование достоверности данных, полученных с помощью методик контроля для акустической идентификации. Согласно главе 3 использованы три основные методики: одноканальный контактный ручной контроль, автоматизированный иммерсионный контроль с линейной ФАР, контроль спроектированным и изготовленным матричным преобразователем со спиральным распределением. Исследование основано на модели формирования и сравнения уникальных идентификационных признаков, предложенной в п. 2.1.

4.1 Одноканальный контактный ручной контроль

Согласно схемам контроля, приведенным на рисунке 3.26 было выполнено 150 измерений контрольных образцов с помощью одноканального датчика. В результате применения модели, предложенной в главе 2 (рисунок 2.14, а), были сформированы результаты контроля в виде А-разверток. Примеры графического представления приведены в таблице 4.1. Таблица 4.1 – А-развертки, полученные при ручном контроле одноэлементным преобразователем.



С помощью разработанного ПО акустической идентификации было проведено установление корреляции между результатами измерений, полученными как в различных, так и в соответствующих точках контроля. Рисунок 4.1, а иллюстрирует результаты сравнения данных полученных с
одной и той же позиции контроля, а рисунок 4.1, б – с различных. Можно заметить очевидную разницу в уровне корреляции. Разброс значений между успешной и ошибочной аутентификаций составляет порядка 50%.



б)

Рисунок 4.1 – Результаты акустической идентификации для ручного одноканального контроля: а) различные измерения в одной позиции; б) различные измерения в различных позициях

Для каждой схемы контроля, приведенной на рисунке 3.26, была рассчитана степень корреляции по каждому из четырех выбранных методов. Определены среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.2–4.7. Далее для отсылки к соответствующему эксперименту используется литера, указанная в заголовке таблицы. Здесь и далее «1» – корреляция, «2» – пересечение, «3» – хи-квадрат, «4» – расстояние Хелингера.

a, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	77,1	82,3	80,2	76,4	79,0	2,8			
2	78,2	80,3	79,1	76,7	78,6	1,5			
3	78,4	82,1	80,3	76,2	79,3	2,5			
4	78,7	78,1	80,9	76,1	78,5	2,0			
5	77,1	82,6	80,9	76,9	79,4	2,8			
6	79,0	78,3	82,4	73,7	78,4	3,6			
7	74,8	77,1	75,9	75,7	75,9	0,9			
8	77,1	80,3	78,9	74,5	77,7	2,5			

Таблица 4.2 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце

Таблица 4.3 – Корреляция для различных позиций на одном образце

б, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	23,3	23,4	12,3	34,5	23,4	9,1			
2	22,4	24,2	15,1	22,1	21,0	4,0			
3	22,1	25,3	13,3	33,3	23,5	8,3			
4	23,0	22,3	10,1	24,1	19,9	6,6			
5	23,3	23,4	12,1	31,1	22,5	7,8			
6	21,3	21,0	11,1	31,8	21,3	8,5			
7	22,3	21,2	11,9	33,0	22,1	8,6			
8	23,8	22,9	10,5	30,3	21,9	8,3			

B, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	22,0	24,2	7,2	26,4	20,0	8,7			
2	23,3	28,4	9,5	24,3	21,4	8,2			
3	22,0	24,2	8,9	24,4	19,9	7,4			
4	23,2	22,1	8,2	26,4	20,0	8,1			
5	22,0	24,2	7,2	26,4	20,0	8,7			
6	22,0	24,2	7,2	26,4	20,0	8,7			
7	22,0	24,2	7,2	26,4	20,0	8,7			
8	22,0	24,2	7,2	26,4	20,0	8,7			

Таблица 4.4 – Корреляция для различных образцов

Таблица 4.5 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием плохого акустического контакта

Г, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		
2	24,5	31,4	23,2	22,5	25,4	4,1		
3	27,7	32,6	18,6	23,2	25,5	6,0		
4	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		
5	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		
6	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		
7	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		
8	27,1	32,3	20,2	24,4	26,0	5,1		

Таблица 4.6 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием поворота преобразователя

д, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	57,3	52,4	50,2	46,2	51,5	4,6			
2	55,2	54,6	52,0	49,8	52,9	2,5			
3	54,9	48,7	53,6	47,3	51,1	3,7			
4	57,3	52,4	50,3	46,1	51,5	4,7			
5	57,3	52,4	50,2	46,2	51,5	4,6			
6	57,3	52,4	50,2	46,2	51,5	4,6			
7	57,3	52,4	50,2	46,2	51,5	4,6			
8	57,3	52,4	50,2	46,2	51,5	4,6			

Таблица 4.7 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием сдвига преобразователя

e, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	23,1	33,7	30,6	26,5	28,5	4,6		
2	22,5	28,4	29,3	28,3	27,1	3,1		
3	21,9	30,3	24,5	23,6	25,1	3,6		
4	23,2	33,3	30,2	26,9	28,4	4,3		
5	23,1	33,7	30,6	26,5	28,5	4,6		
6	23,1	33,7	30,6	26,5	28,5	4,6		
7	23,1	33,7	30,6	26,5	28,5	4,6		
8	23,1	33,7	30,6	26,5	28,5	4,6		

Рисунок 4.2 наглядно иллюстрирует различие между процессом аутентификации, проведенным в идентичной точке и процессом проведенным в различных точках одного или разных образцов.



Рисунок 4.2 – Процент корреляции в экспериментах «а», «б», «в», проведенных одноканальным датчиком

На рисунке 4.2 показаны результирующие графики процентного совпадения в экспериментах «а», «б», «в». Значительно отличаются в показаниях результаты эксперимента «а», уровень корреляции в котором составил 78,3±2,3 %. Эксперименты «б», «в» имеют сравнительно равные низкие значения – уровень корреляции составил в среднем порядка 21±8 %, что отличается от показаний опыта «а» более чем на 50 %.

Рисунок 4.3 иллюстрирует влияние моделирования возможных погрешностей процедуры измерения на уровень корреляции.



Рисунок 4.3 – Процент корреляции в экспериментах «а», «г», «д», «е», проведенных одноканальным датчиком

Уровень корреляции, полученный в эксперименте «а», значительно превышает значения экспериментов «г», «д», «е», причем средний уровень корреляции в опытах «г» и «е» составил 26,9±4,7 %, что также более чем на 50 % отличается от результатов «а». Это означает, что при повороте или смещении одноканального датчика результаты становятся сравнимыми с данными, полученными с другой точки. Данный факт объясняется узким

акустическим полем, проходящим через объект, как при первичной идентификации для создания эталонного сигнала, так и при вторичной аутентификации для установления уровня корреляции. Вследствие этого даже небольшие ошибки в позиционировании преобразователя приводят к невозможности корректно аутентифицировать объект контроля. При этом показания эксперимента «д» в среднем составили 51,6±4,2 %. Следовательно, незначительные проблемы в обеспечении акустического контакта влияют на процесс аутентификации менее значимо в сравнении с неточностью в позиционировании, но при этом показания находятся ниже установленного порога совпадения в 65 %, следовательно, результат контроля будет признан ошибочным.

Изучена степень эффективности применения каждого из четырех методов корреляции. Результаты представлены в таблице 4.8 и на рисунке 4.4.

Таблица 4.8 – Анализ эффективности методов корреляции

Характеристика/метод	1	2	3	4
Среднее для метода	77,6	80,1	79,8	75,8
Общее среднее	78,3			
Среднеквадратичное отклонение	0,55	1,28	1,06	1,80

На рисунке 4.4 отображены результаты экспериментов для образцов № 1–8. Средний уровень корреляции в эксперименте «а» составил 78,3%. Наилучшие показания были получены с использованием метода пересечения, где процент совпадения составил 80,1±1,3 %.



Рисунок 4.4 – Уровень корреляции совпадений в эксперименте «а» для различных методов расчета

Таким образом, можно сделать вывод о применимости предложенной модели для проведения процесса идентификации, т. к. средний уровень корреляции при измерении, снятом в одинаковой позиции для четырех выбранных методов, превысил установленное пороговое значение на 13,3 %, а значения, полученные с другой позиции или иного образца, отличаются от корректной аутентификации более чем на 50 %. При этом стоит отметить высокую точность позиционирования, требуемую для получения верных данных. Поворот преобразователя на 1° или сдвиг преобразователя на 0,5 мм по оси X или по оси Y приводит к полному изменению получаемого сигнала, при этом уровень корреляции сопоставим с данными, полученными с различных точек измерения. Акустически непроницаемое пятно диаметром в

0,8 мм не оказывает столь же сильного влияния на результаты корреляции, но понижает их приблизительно на 25%, что не дает данным корреляции превысить установленный порог в 65%. Упомянутые факторы не позволяют осуществить трансфер технологии в промышленность, но не снижают ценности результатов, доказывающих адекватность предложенной модели обработки сигнала.

4.2. Автоматизированный иммерсионный контроль с линейной ФАР

Процедура измерений проведена 54 раза, в результате чего сформировано 18 УИП, подлежащих дальнейшему корреляционному анализу. Пример построения УИП изображен на рисунке 4.5 (а, б, в).



Рисунок 4.5 – Процесс формирования УИП из трехмерной визуализации: а) трехмерная визуализация результатов УЗ-исследований с помощью метода DFA; б) представление результатов после проведения процедуры сегментации; в) реконструированный трехмерный уникальный идентификационный признак после бинаризации

Проведен корреляционный анализ полученных УИП, рассчитаны среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.9–4.13. Далее для отсылки к

соответствующему эксперименту используется литера, указанная в заголовке таблицы. Здесь и далее «1» – корреляция, «2» – пересечение, «3» –хи-квадрат, «4» – расстояние Хелингера.

a, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	94,2	96,7	93,2	95,1	94,8	1,5		
2	93,5	97,0	94,1	96,2	95,2	1,7		
3	94,4	96,1	95,0	97,1	95,7	1,2		
4	94,1	95,4	97,3	95,4	95,6	1,3		
5	96,3	95,6	93,9	93,7	94,9	1,3		
6	94,3	95,3	92,9	95,7	94,6	1,2		
7	94,9	97,4	95,9	96,3	96,1	1,0		
8	97,5	96,3	94,9	96,5	96,3	1,1		

Таблица 4.9 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце

Таблица 4.10 – Корреляция для различных позиций на одном образце

б, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	71,1	73,1	77,3	70,2	72,9	3,2		
2	68,2	78,3	73,1	70,7	72,6	4,3		
3	72,4	77,2	80,1	79,1	77,2	3,4		
4	74,2	79,3	76,1	72,1	75,4	3,1		
5	72,1	72,9	76,8	73,1	73,7	2,1		
6	77,1	78,3	81,4	73,2	77,5	3,4		
7	74,1	78,2	79,1	75,0	76,6	2,4		
8	71,1	82,1	78,0	74,5	76,4	4,7		

Таблица 4.11 – Корреляция для различных образцов

в, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	20,3	22,6	12,4	22,4	19,4	4,8			
2	21,3	25,9	10,5	22,1	20,0	6,6			
3	25,1	22,8	10,4	21,3	19,9	6,5			
4	21,8	23,9	8,1	26,6	20,1	8,2			
5	22,3	22,1	9,1	26,2	19,9	7,5			
6	21,3	22,5	8,2	28,4	20,1	8,5			
7	21,0	24,1;	7,5	22,4	17,0	10,8			
8	20,1	22,1	7,1	22,7	18,0	7,4			

Таблица 4.12 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием поворота преобразователя

д, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	49,3	57,5	47,1	51,4	51,3	4,5		
2	46,3	44,4	52,7	53,4	49,2	4,5		
3	48,4	46,1	56,3	47,3	49,5	4,6		
4	52,9	45,8	45,4	47,9	48,0	3,4		
5	50,7	54,0	49,9	49,7	51,1	2,0		
6	45,7	49,4	52,0	45,2	48,1	3,2		
7	54,0	46,2	47,3	56,3	51,0	5,0		
8	45,5	48,4	57,8	48,6	50,1	5,3		

Таблица 4.13 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием сдвига преобразователя

e, %									
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
1	80,1	81,9	76,3	74,9	78,3	3,3			
2	80,8	78,8	75,8	76,3	77,9	2,3			
3	81,3	74,9	77,9	80,8	78,7	3,0			
4	82,3	78,0	80,4	81,0	80,4	1,8			
5	78,8	77,6	76,3	80,8	78,4	1,9			
6	82,2	79,4	82,8	79,2	80,9	1,9			
7	81,6	79,0	77,5	82,8	80,2	2,4			
8	81,8	82,9	74,9	79,8	79,9	3,5			

На рисунке 4.6 изображен уровень корреляции для экспериментов «а», «б», «в».



Рисунок 4.6 – Уровень корреляции в экспериментах «а», «б», «в», проведенных с помощью линейной ФАР

Результаты опыта «а» показывают уровень корреляции 95,4±1,3 %, что на 17 % отличается от уровня корреляции, полученного для одноэлементного преобразователя. Более важным с практической точки зрения является результат эксперимента «б», в котором корреляция составила 75,3±3,3 %. Это означает. что тот же участок сварного ОДИН И соединения. проконтролированный с разных сторон шва, аутентифицируется как одно и то же сварное соединение. При этом различие между различными сварными соединениями все еще остается очевидным. Результат корреляции для эксперимента «в» показал самое низкое значение с высокой погрешностью в среднем 19,3±7,5 %.



Рисунок 4.7 – Уровень корреляции в экспериментах «а», «д», «е» проведенных с помощью линейной ФАР

Рисунок 4.7 наглядно иллюстрирует уровень корреляции в экспериментах «а», «д», «е». Стоит отметить, что эксперимент «г» не проводился, т. к. данные получены в иммерсионной среде, подразумевающей стабильный акустический контакт. Заслуживает особого внимания результат эксперимента «е», значение которого превысило выбранный порог на 15 %, что подтверждает возможность компенсации сдвигов преобразователя в пределах 3 мм за счет использования линейной ФАР. При этом зависимость от поворота преобразователя («д») все еще остается значительной. Полученные значения в среднем составляют 49,8±4,1 %.

Проведен анализ успешности использования каждого из четырех методов корреляции. Результаты представлены в таблице 4.14 и на рисунке 4.8.

Таблица 4.14. – Анализ эффективности методов корреляции.

Характеристика/метод	1	2	3	4
Среднее для метода	94,9	96,2	94,7	95,8
Общее среднее		95,	,4	
Среднеквадратичное отклонение	0,34	0,60	0,52	0,26



Рисунок 4.8 – Уровень корреляции совпадений в эксперименте «а» для различных методов расчета

На рисунке 4.8 отображен уровень корреляции для образцов №1-8, среднее значение составило 95,4 %. Аналогично с разделом 4.1 лучшие показания получены с использованием метода пересечения, где уровень корреляции составил 96,2±0,6 %.

Сравнивая результаты, полученные с помощью одноэлементного датчика и линейной ФАР, стоит отметить значительное увеличение качества результатов (17,1 %). Наряду с этим применение линейной ФАР позволяет четко аутентифицировать один и тот же шов с различных позиций и избежать ошибок, связанных со сдвигом преобразователя по оси Х или по оси Y относительно сварного соединения. Промышленное применение данной технологии ограничено необходимостью реализации иммерсионного контакта объекта и преобразователя, а также чувствительностью измерений к поворотам преобразователя вокруг своей оси. Последний фактор обусловлен различием в продольной и поперечной разрешающей способности решетки, так как разрешение в поперечном разрешении зависит от частоты выбранного преобразователя, а в продольном – расстояния между соседними элементами решетки.

4.3 Контроль матричным преобразователем со спиральным распределением

С помощью разработанного в рамках диссертационной работы спирального матричного преобразователя было выполнено две серии измерений: автоматизированный контроль посредством иммерсионного контакта и ручной контактный контроль. Равномерная чувствительность преобразователя во всех направлениях и предложенные к использованию в разработанной модели идентификации УИП алгоритмы фильтрации позволяют получать высококачественные результаты контроля в режиме реального времени. Пример полученного УИП представлен на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Уникальный идентификационный признак сварного соединения, полученный с помощью спирального матричного датчика в ручном режиме

Рассмотрим результаты контроля матричным преобразователем в автоматизированном режиме (далее – МА). Аналогично эксперименту, проведенному с использованием линейной ФАР, выполнено 54 измерения выбранных образцов. Проведен корреляционный анализ полученных УИП, найдены среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.15–4.19. Далее для отсылки к соответствующему эксперименту используется литера, указанная в заголовке таблицы. Здесь и далее «1» – корреляция, «2» – пересечение, «3» – хи-квадрат, «4» – расстояние Хелингера.

Таблица 4.15 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце

a, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	98,5	97,9	98,5	98,6	98,4	0,3		
2	97,7	98,2	97,8	98,5	98,1	0,4		
3	97,4	98,2	97,8	97,3	97,7	0,4		
4	96,5	98,1	98,8	97,8	97,8	1,0		

a, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
5	97,5	97,2	97,9	98,4	97,8	0,5	
6	96,6	98,0	96,8	98,4	97,5	0,9	
7	98,9	99,0	97,8	97,2	98,2	0,9	
8	97,2	97,7	97,0	98,8	97,7	0,8	

Продолжение таблицы 4.15

Таблица 4.16 – Корреляция для различных позиций на одном образце

б, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	96,6	96,9	96,1	98,0	96,9	0,80		
2	96,1	96,9	97,6	97,4	97,0	0,67		
3	97,3	96,0	96,9	96,8	96,8	0,54		
4	98,0	97,8	97,9	97,5	97,8	0,22		
5	96,3	97,8	97,6	96,5	97,1	0,76		
6	97,0	97,5	97,9	97,0	97,4	0,44		
7	96,9	96,5	97,7	98,0	97,3	0,69		
8	97,2	96,9	97,9	96,4	97,1	0,63		

Таблица 4.17 – Корреляция для различных образцов

B, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	21,0	22,3	4,2	23,4	17,7	9,07		
2	22,3	21,4	9,4	22,5	18,9	6,35		
3	21,4	21,2	9,1	19,4	17,8	5,85		
4	21,2	22,1	8,3	22,4	18,5	6,82		
5	21,0	24,1	8,2	19,9	18,3	6,96		
6	22,1	22,1	8,2	19,4	18,0	6,62		
7	22,0	22,1	7,1	23,4	18,7	7,73		
8	22,0	22,5	7,3	19,4	17,8	7,13		

Таблица 4.18 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием поворота преобразователя

д, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
1	93,3	92,2	91,0	91,0	91,9	1,11	
2	90,1	91,5	91,1	93,0	91,4	1,20	

	д, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл			
3	91,0	90,5	93,4	90,4	91,3	1,41			
4	91,7	92,5	90,1	92,7	91,8	1,18			
5	91,6	92,2	92,1	90,0	91,5	1,02			
6	91,3	92,7	91,3	91,4	91,7	0,68			
7	92,4	91,8	90,5	90,5	91,3	0,96			
8	92,3	90,1	92,6	90,3	91,3	1,31			

Продолжение таблицы 4.18

Таблица 4.19 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием сдвига преобразователя

e, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	93,2	92,7	92,9	93,5	93,1	0,35		
2	95,2	93,4	94,9	93,9	94,4	0,84		
3	93,7	94,2	94,4	92,6	93,7	0,81		
4	93,0	93,3	95,2	92,8	93,6	1,10		
5	94,8	94,4	94,7	94,1	94,5	0,32		
6	93,0	92,9	92,9	93,9	93,2	0,49		
7	93,4	93,9	93,4	94,4	93,8	0,48		
8	93,3	92,5	94,4	94,2	93,6	0,88		

Как видно из рисунка 4.10, автоматизированное использование разработанного преобразователя позволяет получать уровень корреляции, равный 97,5±0,6 %, что на 2 % превышает результат, полученный с помощью линейной ФАР. При этом измерение, проведенное с другой стороны сварного соединения, дает идентичный результат, что позволяет утверждать о полной независимости результатов измерения от позиционирования преобразователя. Измерения, проведенные на другом образце, дают существенно более низкий результат с более высокой погрешностью – 18,2±7,1 %.



Рисунок 4.10 – Уровень корреляции для экспериментов «а», «б», «в» при использовании МА

Рисунок 4.11 иллюстрирует низкую степень влияния на результаты контроля поворота преобразователя или его сдвига по осям X, Y. Значения, полученные в эксперименте «а» превышают показания экспериментов «д» и «е», но тем не менее их результаты не ниже 90% уровня корреляции.



Рисунок 4.11 – Уровень корреляции для экспериментов «а», «д», «е» при использовании МА

Проведен анализ эффективности использования каждого из четырех методов корреляции. Результаты представлены в таблице 4.20 и на рисунке 4.12.

Таблица 4.20 – Анализ эффективности методов корреляции

Характеристика/метод	1	2	3	4
Среднее для метода	97,5	98,1	97,8	98,0
Общее среднее		97,	,9	
Среднеквадратичное отклонение	0,239	0,11	0,053	0,18



Рисунок 4.12 – Уровень корреляции, полученный с помощью различных методов для эксперимента «а» при использовании МА

На рисунке 4.12 показан уровень корреляции. В среднем при использовании МА в эксперименте «а» корреляция составила 97,9 %, что по сравнению с другими методиками является лучшим результатом. Максимальные значения с учетом отклонения получены при использовании метода пересечения, где уровень корреляции составил 98,1±0,1 %.

Таким образом, МА показал себя лучшим методом по сравнению с одноэлементным или линейным преобразователем. Применение разработанного матричного датчика позволило снизить до приемлемых уровней погрешность, связанную со сдвигом или поворотом датчика. Последняя серия экспериментов направлена на исследование возможности применения разработанного матричного спирального преобразователя в ручном режиме (далее - МР), что позволит отказаться от необходимости обеспечения иммерсионного контакта.

Выполнено 150 измерений экспериментальных образцов. Проведен корреляционный анализ полученных УИП, найдены среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.21–4.26. Далее для отсылки к соответствующему эксперименту используется литера, указанная в заголовке таблицы. Здесь и далее «1» – корреляция, «2» – пересечение, «3» – хи-квадрат, «4» – расстояние Хелингера.

a, %								
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл		
1	97,3	98,0	96,4	96,7	97,1	0,7		
2	97,1	97,7	96,2	97,1	97,0	0,6		
3	96,1	96,0	96,6	97,2	96,5	0,6		
4	97,8	97,4	96,8	97,2	97,3	0,4		
5	96,4	96,7	98,0	96,2	96,8	0,8		
6	97,1	97,4	96,1	96,3	96,7	0,6		
7	97,5	97,8	96,5	96,3	97,0	0,7		
8	96,9	97,1	96,1	97,5	96,9	0,6		

Таблица 4.21 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце

Таблица 4.22 – Корреляция для различных позиций на одном образце

б, %						
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл
1	22,1	21,7	11,0	30,1	21,2	7,8
2	26,4	23,5	13,7	20,4	21,0	5,4
3	24,1	22,3	13,2	32,1	22,9	7,8

Продолжение	таблицы	4.22
-------------	---------	------

б, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
4	23,2	23,3	12,1	21,0	19,9	5,3	
5	23,2	22,4	11,0	32,1	22,2	8,7	
6	21,6	20,0	12,0	30,8	21,1	7,7	
7	22,1	19,2	8,9	31,0	20,3	9,1	
8	21,9	20,1	9,1	28,1	19,8	7,9	

Таблица 4.23 – Корреляция для различных образцов

в, %						
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл
1	23,0	21,2	7,4	25,4	19,3	8,1
2	22,4	28,2	8,5	25,1	21,1	8,7
3	22,5	24,3	9,2	22,4	19,6	7,0
4	22,1	22,6	8,6	23,4	19,2	7,1
5	23,0	23,2	7,4	21,4	18,8	7,6
6	21,0	22,3	7,5	23,4	18,6	7,4
7	23,0	22,5	7,7	23,4	19,2	7,6
8	22,5	24,3	6,9	26,4	20,0	8,9

Таблица 4.24 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием плохого акустического контакта

г, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
1	29,3	27,4	31,5	27,1	28,8	2,0	
2	30,9	30,8	32,8	28,9	30,9	1,6	
3	27,1	31,9	27,9	23,2	27,5	3,6	
4	29,7	29,2	30,6	28,9	29,6	0,7	
5	32,9	27,5	30,9	28,9	30,1	2,4	
6	27,3	28,8	31,5	29,9	29,4	1,8	
7	33,0	27,8	32,4	28,4	30,4	2,7	
8	30,7	31,6	31,1	28,5	30,5	1,4	

Таблица 4.25 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием поворота преобразователя

д, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
1	94,7	95,6	94,7	95,8	95,2	0,6	
2	94,5	93,6	93,3	95,2	94,2	0,9	
3	95,7	95,2	93,5	95,1	94,9	1,0	
4	93,8	93,7	95,6	93,9	94,3	0,9	
5	96,2	94,2	94,3	95,9	95,2	1,0	
6	94,2	96,7	95,5	95,4	95,5	1,0	
7	94,6	95,0	95,9	95,6	95,3	0,6	
8	96,1	95,7	95,8	94,9	95,6	0,5	

Таблица 4.26 – Корреляция для идентичной позиции на одном образце с моделированием сдвига преобразователя

e, %							
образец/метод	1	2	3	4	рез.(ср.ариф)	ср.кв.откл	
1	93,5	94,9	93,7	94,7	94,2	0,7	
2	94,3	95,9	95,5	95,9	95,4	0,8	
3	93,7	94,1	95,3	94,1	94,3	0,7	
4	93,3	94,8	94,4	94,7	94,3	0,7	
5	94,2	94,4	94,7	95,1	94,6	0,4	
6	93,5	95,1	95,0	94,1	94,4	0,8	
7	94,6	95,9	95,4	95,9	95,5	0,6	
8	93,7	95,6	94,1	95,3	94,7	0,9	

Рисунок 4.13 иллюстрирует уровень корреляции, полученный с

помощью МР для экспериментов «а», «б», «в».



Рисунок 4.13 – Уровень корреляции для экспериментов «а», «б», «в», выполненных с помощью МР

Стоит отметить, что, в отличие от МА, по условиям МР, измерения поводятся в точке, где проводится сканирование вдоль всего сварного соединения. Это факт обуславливает различие между МР и МА в показаниях эксперимента «б». При контроле МР в различных точках одного и того же образца не происходит перекрытия областей прозвучивания, что приводит к уровню корреляции, аналогичному другому экспериментальному образцу. Область отбора пробы для МР должна быть не больше удвоенной апертуры преобразователя. В таком случае результаты остаются на уровне эксперимента «а», уровень корреляции в котором составил 96,9±0,6 %.



Рисунок 4.14 – Уровень корреляции для экспериментов «а», «г», «д», «е», выполненных с помощью МР

На рисунке 4.14 показано влияние погрешностей на конечный уровень корреляции. Погрешности, вызванные неточным позиционированием (сдвиг или поворот) преобразователя, не вносят существенных изменений в конечный результат ввиду изотропной чувствительности разработанного преобразователя. Отсутствие акустически проводящей среды размером в 30 % апертуры преобразователя вносит существенные изменения в конечный результат и делает невозможным проведение измерения. Уровень корреляции для эксперимента «г» в среднем составил 29,6±2 %.

Проведен анализ эффективности использования каждого из четырех методов корреляции. Результаты представлены в таблице 4.27 и на рисунке 4.15.

Таблица 4.27 – Анализ эффективности методов корреляции

Характеристика/метод	1	2	3	4
Среднее для метода	97,0	97,3	96,6	96,8
Общее среднее		96,	9	
Среднеквадратичное отклонение	0,073	0,24	0,236	0,08



Рисунок 4.15 – Уровень корреляции, полученный с помощью различных методов для эксперимента «а» при использовании МР

На рисунке 4.15 представлены результаты эксперимента «а», полученные с помощью МР. Средний уровень корреляции составил 96,9 %. Наилучшие показания получены с использованием метода пересечения, где процент совпадения составил 97,3±0,2 %.

Основываясь на полученных результатах, можно утверждать, что контроль MP столь же устойчив к внешним факторам, как и MA.

Фундаментальным исключением остается нарушение акустического контакта между преобразователем и объектом контроля.

4.4 Выводы к главе 4

По итогам проведения четырех запланированных серий экспериментов можно сделать вывод о применимости предложенного метода и модели акустической идентификации сварных соединений. Результаты эксперимента «а» лежат в пределах 78,3-97,9 %, что существенно выше заданного порога совпадений в 65%. Уровень корреляции эксперимента «в» составляет 18,3-21,0%, что более чем на 50 % отличается от корректной аутентификации и в среднем на 45 % ниже заданного порога совпадений. Стоит отметить, что ручной контроль показал низкие результаты в эксперименте «б», в то время как автоматизированный контроль показал результаты уровне на эксперимента «а». Данный факт связан с выбранной зоной прозвучивания – в автоматизированном контроле проводилось сканирование вдоль сварного соединения, в то время как ручной контроль проводился в режиме точечного пробоотбора. Анализируя эксперименты «г», «д», «е», можно утверждать, что наличие качественного акустического контакта остается фундаментальным требованием для проведения контроля, в то время как погрешности связанные с поворотом и сдвигом преобразователя, удалось компенсировать с помощью разработанного спирального матричного преобразователя, использованного как в автоматизированном, так и в ручном режиме.

Сравнение результатов эксперимента «а» для МР и МА представлено на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 – Доля совпадений в опытах «а» для образцов МА и МР, выполненных четырьмя методами

МА в среднем на 1 % превосходит результаты МР, но такая разница не является определяющей для выбора производственного метода применения данной технологии. Использование МА является обоснованным при наличии соответствующего манипулятора и технологии обеспечения иммерсионного контакта на промышленном объекте контроля. Возможно совмещение МА с процедурой производственной и эксплуатационной дефектоскопии объекта контроля. В случае отсутствия вышеупомянутых технологий использование МР является наиболее рациональным и экономически оправданным решением.

Разница в эффективности различных методов корреляции невысока и лежит в пределах 5 % для всех методов. При этом пересечение всегда показывало наиболее точные результаты, поэтому данный метод может быть использован в дальнейшем в качестве единственного метода корреляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ha основе выполненного обзора отечественных и зарубежных публикаций в области систем пломбирования был сделан вывод, что, несмотря разработок В области на передовых разработки наличие систем пломбирования, наиболее широкое применение в промышленности находят устройства разработанные в 1980-1990-х гг. При этом имеется нормативноправовая возможность внедрения технологий, основанных на контроле целостности герметизирующих соединений посредством рентгенографического и ультразвукового контроля. Также определен круг объектов атомной техники, попадающих под данные требования – основным объектом являются пеналы для сухого хранения ОЯТ. Решением для обеспечения учета и контроля подобных объектов может послужить аппаратного И методического обеспечения разработка акустического измерения структурных особенностей конструкционного материала сварного соединения для формирования его УИП, что и стало целью настоящих диссертационных исследований.

Основные результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. Разработана модель формирования УИП с использованием акустического сигнала. Предложены и реализованы в разработанном в рамках диссертационной работы программном обеспечении методы корреляционного сравнения УИП.

2. Разработана конструкция спирального матричного преобразователя, обладающего изотропной чувствительностью. Преобразователь был изготовлен согласно предложенной конструкции и успешно прошел апробацию.

3. Проведены эксперименты на контрольных образцах ФГУП ФЯО ГХК. Разработано четыре способа проведения процедуры УЗК: ручной контактный контроль, автоматизированное иммерсионное сканирование линейной ФАР, ручной контактный контроль матричным преобразователем и автоматизированное иммерсионное сканирование матричным преобразователем. Определены основные факторы, потенциально вносящие наибольшую погрешность в результат измерения: нарушение акустического контакта, сдвиг преобразователя по оси X или оси Y, поворот преобразователя вокруг своей оси. Предложена методика определения уровня погрешности от данных факторов.

4. Определены уровни корреляции УИП для всех контрольных образцов. полученные с разработанного Результаты, помощью матричного преобразователя, показали наибольший уровень корреляции. Использование разработанного преобразователя, обладающего изотропной чувствительностью, позволяет компенсировать погрешности, связанные с Bce И сдвигом преобразователя. поворотом предложенные методы корреляционного анализа подтвердили свою состоятельность. Лучшие результаты были получены во всех сериях экспериментов с помощью метода пересечения.

Исследование финансовой поддержке Ф∐П выполнено при «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» - Разработка технологии диагностики и оценки остаточного ресурса контейнеров с отработавшим ядерным топливом на базе метода ультразвуковой томографии, субсидии ОТ «27» соглашение 0 предоставлении июня 2014 Γ. № 14.575.21.0048, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0048.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Излучатель

Количество излучателей	128
Напряжение зондирующего	-50 до -180 Вольт на нагрузку 50 Ом
импульса	
Форма зондирующего импульса	прямоугольный, отрицательный
Ширина зондирующего импульса	от 12,5 нс до 800 нс, регулируется с
	шагом 2 нс
Длительность фронта	9 нс \pm 3 нс (нарастание амплитуды от
	10 % до 90 %)
Длительность спада	20 нс \pm 5 нс (спад амплитуды от 90 %
	до 10 %)
Выходной импеданс	50 Ом
Частота следования	до 15 КГц, в зависимости от ширины
	импульса, зондирующего
	напряжения, частоты дискретизации
	и диапазона контроля
Задержка зондирующего импульса	от 0 нс до 12,8 мкс с шагом 0,25 нс

Таблица А.2 - Усилительный тракт

Количество приёмников	128 (16 MUX 8)		
Пороговое значение входного	100 мкВ		
напряжения			
Макс. значение входного	10 B _{SS}		
напряжения			
Динамика усилительного тракта	>100 дБ		
Значения усиления	0-100 дБ, с шагом 0.1 дБ		
Тип усилительного тракта	линейный		
Линейность вертикального тракта	< ± 1% высоты экрана		
усилителя			
Частотный диапазон усилительного	от 500 КГц до 20 МГц		
тракта	(по уровню –3 дБ)		
Аналоговые фильтры	2 полосовых фильтра на выбранных		
	частотах		
Режимы работы	Эхо-импульсный, раздельно-		
	совмещённый		
Установка задержки сигнала в	Точная установка: от 3.2 нс до 14.8 нс		
канале	с шагом 10 пкс, Грубая установка: от		
	12.5 нс до 819 мкс с шагом 12.5 нс		

Таблица А.3 – Цифровой блок

АЦП	14 бит (13 бит + знаковый бит), 80
	МГц
Динамический диапазон АЦП	> 72 дБ при частоте оцифровки 80
	МГц
Частота оцифровки	80, 40, 20, 10 МГц, регулируемо для
	такта измерения
Временное разрешение	12.5, 25, 50, 100 нс в зависимости от
	частоты оцифровки
Длина данных в канале	до 65.535 сэмплов

Таблица А.4 – Обработка сигналов в многоканальном режиме

Эхо-стартовый строб (US0)	от 0 до 819 мкс, разрешение 12.5 нс,
	тип строба: превышение порога /
	окончание строба или постоянная
	величина задержки 0-819 мкс, с
	разрешением 12.5 нс
Вывод ВЧ сигналов	Кол-во рабочих диапазонов:1
	Длина рабочего диапазона: 819 мкс –
	52.5 мс в зависимости от частоты
	дискретизации (коэффициент
	масштабирования 1 – 64)
	Начало рабочего диапазона: от US0
	до 819 мкс, разрешение 12.5 нс
	Формат значений: 16 бит (14 бит
	АЦП + переполнение)
Стробы	Количество стробов: 4 (наложение
	возможно)
	Длина рабочего диапазона: US0 –
	819 мкс, с разрешением 12.5 нс
	Формат значений: 16 бит (амплитуда
	14 бит АЦП + переполнение, время
	пробега 16 бит, разрешение 12.5 нс)
А-скан	Кол-во рабочих диапазонов: 1
	Длина 125, 250, 500, 1000 пикселей
	Начало: от US0 или зондирующего
	импульса
	Длина диапазона: в зависимости от
	длины ВЧ сигнала и коэффициент
	масштабирования 1-255
	Формат значений: 16 бит (14 бит
	АЦП + переполнение)

Таблица А.5 – Обработка сигналов в режиме обычной фазированной решётки

Вывод ВЧ сигналов	Кол-во рабочих диапазонов: 1
	Ллина рабочего диапазона: 819 мкс –
	52.5 мс в зависимости от частоты
	лискретизации(коэффициент
	масштабирования 1 – 64)
	Начало рабочего лиапазона: от USO
	ло 819 мкс разрешение 12.5 нс
	Формат значений: 16 бит (14 бит
	$\Delta IIII + переполнение)$
Строби	Колицаатро атробор: 4 (наножанна
Стробы	Количество строоов. 4 (наложение
	Длина расочего диапазона: $USU = $
	$\delta 19$ MKC, C paspellenuem 12.5 HC
	Формат значении: 16 оит (амплитуда
	14 оит АЦП + переполнение, время
	пробега 16 бит, разрешение 12.5 нс)
А-скан	Кол-во рабочих диапазонов: 1
	Длина 125, 250, 500, 1000 пикселей
	Начало: от US0 или зондирующего
	импульса
	Длина диапазона: в зависимости от
	длины ВЧ сигнала и коэффициент
	масштабирования 1-255
	Формат значений: 16 бит (14 бит
	АЦП + переполнение)
Пикселированный А-скан (TD)	Кол-во рабочих диапазонов: 1
	Длина диапазона: в зависимости от
	длины ВЧ сигнала
	Начало диапазона: в зависимости от
	начала диапазона ВЧ сигнала
	Длина рабочего диапазона: в
	зависимости от длины ВЧ сигнала и
	фактора сжатия 3 – 255
	Формат значений: 16 бит (14 бит
	АЩП + переполнение)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

		Ширина полосы	Ширина полосы
	Измеренная	пропускания,	пропускания, %
Номер элемента	частота, МГц	МГЦ	
1	5,98	2,61	44
2	6,47	2,30	36
3	6,17	2,73	44
4	6,14	2,74	45
5	6,30	2,73	43
6	6,29	2,68	43
7	6,28	2,59	41
8	6,14	2,70	44
9	6,00	2,78	46
10	6,13	2,56	42
11	6,07	2,53	42
12	5,98	2,86	48
13	6,08	2,84	47
14	6,15	2,57	42
15	6,19	2,70	44
16	6,01	2,72	45
17	6,03	2,72	45
18	6,03	2,63	44
19	6,13	2,79	46
20	6,03	2,75	46
21	5,98	2,76	46
22	6,01	2,59	43
23	5,97	2,85	48
24	5,49	3,14	57
25	5,75	3,26	57
26	6,32	2,06	33
27	6,03	2,65	44
28	5,98	2,53	42
29	6,20	2,68	43
30	6,29	2,66	42
31	6,07	2,74	45
32	5,85	2,84	49

Таблица Б.1 – Определение частотного спектра изготовленного датчика

			Сдвиг, мс
	Усиление сигнала	Отклонение значения	
	до 80% от высоты	усиления от среднего	
Номер элемента	экрана, дБ	значения, дБ	
1	58,50	-2,2	0,30
2	58,25	-2,5	0,31
3	61,00	0,3	0,29
4	60,50	-0,2	0,32
5	58,75	-2,0	0,30
6	59,50	-1,2	0,31
7	60,75	0,0	0,31
8	59,75	-1,0	0,30
9	59,50	-1,2	0,32
10	59,00	-1,7	0,30
11	58,75	-2,0	0,30
12	64,00	3,3	0,30
13	58,50	-2,2	0,30
14	59,25	-1,5	0,31
15	61,50	0,8	0,30
16	61,50	0,8	0,30
17	60,50	-0,2	0,31
18	61,75	1,0	0,32
19	60,00	-0,7	0,32
20	63,25	2,5	0,31
21	59,75	-1,0	0,31
22	59,75	-1,0	0,31
23	65,00	4,3	0,32
24	61,50	0,8	0,31
25	64,75	4,0	0,32
26	58,75	-2,0	0,31
27	64,00	3,3	0,31
28	59,25	-1,5	0,31
29	59,00	-1,7	0,30
30	62,75	2,0	0,31
31	62,00	1.3	0,31
32	61,50	0,8	0,30

Таблица Б.2 – Определение чувствительности элементов

ПРИЛОЖЕНИЕ В



внедрения результатов диссертационной работы Седнева Дмитрия Андреевича

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой ФЭУ, к.ф.-м.н., доцент Долматов О.Ю., члены комиссии: доцент кафедры ФЭУ, к.ф.-м.н., Исаченко Д.С., доцент кафедры ФЭУ, к.т.н. Демянюк Д.Г. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Седнева Д.А. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ «РАЗРАБОТКА OCHOB АКУСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля природной среды. веществ, материалов и изделий, используются в учебном процессе на кафедре физико-энергетических установок Томского политехнического университета в методических материалах дисциплин: «Материаловедение», «Основы ядерного нераспространения и безопасного обращения с ядерными материалами», а также при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ студентами кафедры.

Председатель комиссии

О.Ю. Долматов

Члены комиссии

tu -Д.С. Исаченко

Д.Г. Демянюк

144 ПРИЛОЖЕНИЕ Г



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Седнева Дмитрия Андреевича

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Седнева Д.А. «РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий в диссертационный совет Д 212.269.09 используются в производственном процессе АО «ОДЦ УГР».

ОДА И

44 01 W

Генеральный директор АО «ОДІРУГР» АО

А.М. Изместьев
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров В. Г. Противодействие радиологическому терроризму: проблемы и перспективы // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2014. - №8. – С. 110-113

2. Запороцкова И.В., Кислова Т.В., Горемыкина Ю.Ю., Сухарев А.Г. Применение сканирующей зондовой микроскопии для создания защитных наномаркировок // Вестник ВолГУ. – Серия 10. – 2008. – Т. 10. – №. 3. – С. 81

3. Запорно-пломбировочные устройства [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – SciTech Connect. – Режим доступа: http://www.zpu-center.ru/press/articles/articles 12.html, свободный

4. Garwin R. L. et al. Monitoring and Verification of Nuclear Weapons. Proc. Short Course on Nuclear Weapons Issues in the 21st Century, The George Washington University Elliott School of International Affairs, Washington, DC, November 3, 2013

5. Tsai H., Liu Y. Y., Shuler J. Monitoring critical facilities by using advanced RF devices. Proc. 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Global Partnering, Brussels, Belgium, September 8–12, 2013

6. Рекомендации по применению систем пломбирования в организациях Госкорпорации «Росатом» для целей учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – ФГУП ВНИИА. – Режим доступа: http://www.vniia.ru/rgamo/literat/sprmat/doc/rekomendacii, свободный

7. R. Ghanbaria, K.M. Tolk, W.S. Charlton Innovative Foundations in the Field of Tags, Seals, and Remote Monitoring Systems. Proc. Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 1-5 November 2010

8. Dugan S. et al. Detection and sizing of stress corrosion cracks in austenitic components using ultrasonic testing and synthetic aperture focusing technique // VGB Power Tech. -2015. - Vol. 1. - P. 93-96

9. Clayton D. A., Smith C. M. Comparative testing of nondestructive examination techniques for concrete structures. Proc. SPIE 9063, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, 2014, March, 9

10. Li G., Feng M., Wang F. Hot cell post-irradiation examination and poolside inspection of nuclear fuel. Proceedings of the IAEA–HotLAb technical Meeting held in Smolenice, Slovakia, 23–27 May 2011

 Bakhtiari S. et al. Development of a novel ultrasonic temperature probe for long-term monitoring of dry cask storage systems. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation // AIP Publishing. – 2013. – Vol. 1511/1. – P. 1526-1533

12. Sun X. et al. Proc. SPIE 9439, Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems, 2015, March, 27

13. Шаманин И. В. и др. Оптимизация нейтронно-физических характеристик систем хранения отработанного топлива // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №. 4.

14. ГХК провел испытания контейнера для хранения ОЯТ
 [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Федеральный центр Ядерной и радиационной Безопасности. – Режим доступа: http://www.fcnrs.ru/monitoring, свободный

15. Пат. 2435239 РФ, МПК G21C19/06. Герметичный пенал хранения отработавшего ядерного топлива. Средства для крепления или хранения топливных или управляющих элементов / Гаврилов П. М., Ревенко Ю. А., Бараков Б. Н., Гамза Ю. В., Федосов Ю. Г., Калинкин В. И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат». – № 2010129383/07; заявл. 15.07.10; опубл. 27.11.11, Бюл. №33

 Аганаев Ю. П. Моделирование кристаллизации сварного шва // Ползуновский альманах. – 2004. – №. 4. – С. 189-191.

17. Инструкция по осуществлению надзора за учетом и контролем ядерных материалов с применением пломб [Электронный ресурс]: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 марта 2008 г. №178. – Электрон. текстовые дан. – Техническая литература. – Режим доступа: http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/54/54860/, свободный

 Друзьяков, Александр. О современных пломбировочных устройствах [Электронный ресурс] / А. Друзьяков. – Офиц. сайт. – БДИ, № 3, 2006. – Режим доступа: http://mx1.algoritm.org/arch/?id=21&a=515, свободный

19. НП 030-12. Основные правила учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс]: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 апреля 2012 г. №255. – Электрон. текстовые дан. – Российская газета. – Режим доступа: http://www.rg.ru/2012/10/30/atom-uchet-site-dok.html, свободный

20. ГОСТ Р 51912. Устройства пломбировочные. Классификация. – Москва: Изд-во стандартов, 2002 г.

21. Джонстон, Р. Пломбы с индикацией вмешательства для ядерного разоружения и обращения с опасными отходами [Электронный ресурс] / Р. Джонстон. – Офиц. сайт. – Science and global security – Режим доступа: http://scienceandglobalsecurity.org/ru/archive/sgsr09johnston, свободный

22. Python fiber optic seal [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – SciTech Connect. – Режим доступа: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10179124, свободный

 Пат. 2513765 РФ, МПК G06K7/10. Оптическая пломба / Моссаковский С. Ю., Подгорнов В. А.; заявитель и патентообладатель С. Ю. Моссаковский, В. А. Подгорнов. – №2012142953/08; заявл. 10.08.12; опубл. 20.04.14, Бюл. №11 24. Y. Yamamoto et al., Development of Electronic Verifier of COBRA Seal [Электронный ресурс] / Y. Yamamoto. – Офиц. сайт. – Japan Atomic Energy Research Institute – Режим доступа: http://jolisfukyu.tokaisc.jaea.go.jp/fukyu/tayu/ACT95E/12/1201.htm, свободный

25. Пломба оптическая петлевая ОПП-1М. Устройство запорнопломбировочное типа ЗП-1 [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – ФГУП Приборостроительный завод. – Режим доступа: http://www.imf.ru/?subm=3&sid=1&ssid=3&lsid=2, свободный

26. Development of the VACOSS-S sealing system. Joint Programme on the Technical Development and Further Improvement of IAEA Safeguards, Task D.15, 1988, July

27. Roumen Tzolov. User Requirements for the New Electronic Seal (Electro-Optical Sealing System). Proc. Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 1998

28. Анисимов, О.П. Экономика и безопасность длительного хранения ОЯТ. В кн.: Безопасность ядерных технологий: экономика безопасности и обращение с ИИИ / О.П. Анисимов, В.И. Калинкин, Н.П. Шафрова. – СПб, 2005

29. Макарчук Т.Ф. Перспективы контейнерного хранения ОЯТ энергетических реакторов [Текст] / Т.Ф. Макарчук, А.А. Глухов, А.Л. Семенов // Безопасность Окружающей Среды: Обращение с ОЯТ. – 2010. – №1

30. Васильев, А.С. Создание ресурсосберегающего производства экологически безопасного транспортно-упаковочного комплекта для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива [Текст] / А.С. Васильев, И.Р. Шегельман, А.В. Романов // Наука и бизнес: пути развития. – 2012. – № 1(07). – С. 62-65

31. J. Kessler, Industry Spent Fuel Storage Handbook. – Electric Power Research Institute, 2010, July;

32. Хранение отработавшего ядерного топлива [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Игналинская АЭС.. – Режим доступа:

http://www.iae.lt/ru/deyatelnost/snyatie-s-ekspluatacii/hranenie-otrabotavshegoyadernogo-topliva, свободный

33. Комаров, С.В. Контейнеры SKODA VPVR/М: сертификация в России и опыт использования / С.В. Комаров, К.В. Голубкин, А.Е. Бучельников, В.И. Шаповалов // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2011. – №1

34. Михайлович, Г.П. Горно-химический комбинат – будущий кластер по обращению с ОЯТ / Г.П. Михайлович, Ю.А. Ревенко, И.А. Меркулов // Безопасность Окружающей Среды: Обращение с ОЯТ. – 2010. – №1

35. Образование сварочной ванны, формирование н кристаллизация металла шва [Электронный ресурс]: эл. энциклопедия. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: http://www.tehnoinfa.ru/tehnologijasvarki/12.html, свободный

Зб. Строение и кристаллизация сварного шва [Электронный ресурс]:
офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Центральный металлический портал
РФ. – Режим доступа: http://metallicheckiyportal.ru/articles/svarka/dugovaa_svarka/svarnie_soedinenia_i_shvi/stroenie_svarn
одо_shva, свободный

37. Кристаллизация металла в сварочной ванне [Электронный ресурс]: интернет-учебник. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: http://svarkainfo.ru/rus/lib/book/kristmet/, свободный

38. Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – 184 с.

39. Лившиц, Л. С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Л.
 С. Лившиц. – Машиностроение, 1979. – 253 с.

40. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали.
Методы испытаний и исследования: справочник в 3-х т. / Бернштейн М.Л.,
Рахштадт А. Г. – М.: Машиностроение, 1983. — 352 с.

41. Ефремов, Д. А. Использование отпечатков пальцев в задачах биометрического ограничения доступа [Электронный ресурс] / Ефремов Д.А., Борисова С. Н. – Офиц. сайт. – Российская академия естествознания. – Режим доступа: http://www.rae.ru/use/pdf/2011/7/128.pdf, свободный

42. Фан Нгок Хоанг, В.Г. Спицын. Алгоритмы для классификации отпечатков пальцев на основе применения фильтра Габора, вейвлет-преобразования и многослойной нейронной сети // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5

43. Регламент Удостоверяющего центра Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – РосМинТруд. – Режим доступа: www.rosmintrud.ru/ministry/gis/uc/uc docs/Reglament UTC.docx, свободный

44. Идентификация по отпечаткам пальцев [Электронный ресурс]: эл. библиотека. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: http://masters.donntu.org/2008/kita/petrova/library/art6.htm, свободный

45. Известия высших учебных заведений. Приборостроение [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Университет ИТМО. – Режим доступа: http://pribor.ifmo.ru/file/article/4690.pdf, свободный

46. Пат. 2486590РФ, МПК G06К9/68. Способ и устройство инвариантной идентификации отпечатков пальцев по ключевым точкам / Огнев А. В., Типикин А. П., Титенко Е. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗ ГУ). – № 2012113754/08; заявл. 06.04.12; опубл. 27.07.13, Бюл. №18

47. Болотина И.О., Лидер А.М., Седнев Д.А. Разработка технологии диагностики и оценки остаточного ресурса контейнеров с отработавшим ядерным топливом на базе метода ультразвуковой томографии // Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполненных вузами и научными организациями Сибирского федерального округа в рамках участия в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий в 2014 году: тезисы докладов научнотехнической конференции – ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», 2014. – С.43-47

48. Бориков В. Н., Рычков М. М., Капранов Б. И., Седнев Д. А., Вавилов В. П. Технологии и комплексы томографического неразрушающего контроля нового поколения // Космическое приборостроение: сборник научных трудов III Всероссийского форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Томск, 8-10 Апреля 2015. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 21-30

49. Кренинг Х-М., Демянюк Д.Г., Лидер А.М., Седнев Д.А. Применение ультразвукового метода неразрушающего контроля в целях учета и контроля ядерного материала // Перспективные направления развития атомной отрасли: сборник тезисов Школы-конференции молодых атомщиков Сибири; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С.236-238.

50. Жуков, Сергей. О пьезокерамике и перспективах ее применения [Электронный ресурс] / С. Жуков. – Офиц. сайт. – Компоненты и технологии, № 1, 2001. – Режим доступа: http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_01_48.pdf, свободный

51. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006.

52. Sharapov, V. Piezoceramic sensors / V. Sharapov // Springer Verlag,2010

53. Преобразователи. Классификация преобразователей [Электронный ресурс]: инф. база. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: http://www.ce-studbaza.ru/schriebe.php?id=643, свободный

54. Регистрация эха [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – РДМ-контакт. – Режим доступа: http://www.rdm-kontakt.ru/science.2.html, свободный

55. Выбор ФР-преобразователя [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Olympus Corp. – Режим доступа: http://www.olympus-ims.com/ru/ndt-tutorials/transducers/summary/, свободный

56. Pollock, D. S. G. The sampling theorem and the bandpass theorem [Электронный ресурс] / D. S. G. Pollock. – Офиц. сайт. – University of Leicester. – Режим доступа: http://www.le.ac.uk/users/dsgp1/ERC14/Chapter3.pdf, свободный

57. Титов, В.Ю. Совершенствование методических основ обеспечения единства измерения для повышения точности ультразвукового контроля [Текст]: дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук: 05.11.15 / Титов Вячеслав Юрьевич. – Москва, 2014. – 148 с.

58. Kryoning K. V., Salchak Y. A., Sednev D. A. Closure Welds Identification by Means of Ultrasonic Testing // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 933-936

59. Крёнинг Х. В., Демянюк Д. Г., Лидер А. М., Седнев Д. А. Устройства индикации вмешательства: внутренне присущие контролируемые признаки // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 4/2. - С. 172-177

60. Хохлова, В. А. Численное моделирование нелинейных и дифракционных эффектов в звуковых пучках [Электронный ресурс] / В. А. Хохлова, О. А. Сапожников, А. Е. Пономарев, О. В. Руденко. – Офиц. сайт. – Каф. Акустики ФМ МГУ. – Режим доступа: http://acoustics.phys.msu.ru/praktikum/zadacha5.pdf, свободный

61. Nikolov, M. Analysis and Optimization of Medical Ultrasound Imaging Using the Effective Aperture Approach / M. Nikolov, Behar, V. // Cybernetics and Information Technologies, Sofia, 2005. – Vol. 5/2

62. Chang, Y.F. Kirchhoff migration of ultrasonic images / Y. F. Chang, R.
C. Ton // Materials Evaluation, ASNT, 2001. – Vol. 59/3

63. Connolly, G.D. Modelling of the Propagation of Ultrasound through Austenitic Steel Welds / G.D. Connolly // PhD-Thesis, Imperial College London, University of London, 2009 64. Sava, P. 3-D traveltime computation using Huygens wavefront tracing
/ P. Sava, S. Fomel // Geophysics. - 2001. - Vol. 66. - No. 3. - P. 883-889

65. Sudha, S. Speckle Noise Reduction in Ultrasound Images by Wavelet Thresholding based on Weighted Variance / S. Sudha, G.R. Suresh, R. Sukanesh // Int. Journal of Computer Theory and Engineering. – 2009. – Vol. 1

66. Kroning D., Krening M., Sednev D. A., Mohr F., Reddy K. M. Image sequence analysis for sensor position control in NDT // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 177-181

67. Kroning D., Krening M. K., Mohr F., Reddy K. M., Sednev D. A. Image sequence analysis for sensor position control in NDT // Инновации в неразрушающем контроле: сборник трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Томск, 12-17 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 108-114

68. Седнев Д.А., Катаева О.И. Применение ультразвукового метода контроля для диагностики остаточного ресурса контейнера сухого хранения ОЯТ // Сборник тезисов «V Школа-конференции молодых атомщиков Сибири» – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2014. – С.56

69. Barrett, H. H. Foundations of image science / H. H. Barrett, K. J. Myers // Wiley, New York, 2003.

70. Kovesi, P. Symmetry and asymmetry from Local Phase / P. Kovesi // Tenth Australian joint conference on artificial intelligence, 1997

71. Arce, G.R. Nonlinear Signal Processing / G.R. Arce // A Statistical Approach, Wiley, New Jersey, 2005

72. Stolt, R.H. Seismic Migration: Theory and Practice / R. H. Stolt, A.K.
Benson // Handbook of Geophysical Exploration. – Geophysical Press. – 1986. –
Vol. 5

73. Lockwood, G.R. Real-Time 3-D Ultrasound Imaging Using Sparse Synthetic Aperture Beamforming / Lockwood G.R, Talman J.R, Brunke S.S // IEEE

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998. – Vol. 45. – No. 4

74. Huang, T.S. Image Sequence Analysis / T.S. Huang // Springer Series in Information Science. – 1981. – Vol. 5

75. Gandhi, T.L. Image Sequence Analysis for Object Detection and Segmentation / T.L. Gandhi // PhD Thesis in Computer Science and Engineering, The Pennsylvania State University, 2000

76. Tanathong, S. Realtime image matching for vision based car navigation with built-in sensory data / S. Tanathong, H. Kim, // ISPRS Workshop ISA13 - Image Sequence Analysis, Antalya, 2013

77. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер с англ. под ред. П. А. Чочиа.— М.: Техносфера, 2006.— 1070 с.

78. Шикин, А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели / А.
В. Шикин, А. В. Боресков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 464 с.

79. Darmon, M. An integrated model to simulate the scattering of ultrasounds by inclusions in steels / M. Darmon, P. Calmon. B. Bèle // Ultrasonics. – 2004. – Vol. 42. – P. 237-241

80. Austeng, A. Sparse 2-D Arrays for 3-D Phased Array Imaging-Design Methods / A. Austeng, S. Holm // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2002. – Vol. 49

81. Reverdy, F. Advanced Ultrasonic 2-D Phased Array Probes / F. Reverdy, G. Ithurralde, N. Dominguez // Proc. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012

82. Sumanaweera, T.S. A Spiral 2-D Phased Array for 3-D Imaging / T.S. Sumanaweera, J. Schwartz, D. Napolitano // Ultrasonics Symposium, 1999. – Vol. 2

83. Kumar, D. Connected components filtred real-time text localization algorithm for videos [Электронный ресурс] / D. Kumar, J. Vivek Veeriah, K.R. Ramakrishnan – Офиц. сайт. – Law Lanka. – Режим доступа: http://lawlanka.com/vivek/pdf/cctext.pdf, свободный

84. Филиппова, Вера. Исследование методов ранжирования изображений автомобилей по критерию схожести [Электронный ресурс] / В. Филиппова, В. Постников – Офиц. сайт. – ИТиС. – Режим доступа: http://itas2011.iitp.ru/pdf/1569468353.pdf, свободный

85. Костюкова, Н. С. Использование 2d-цветовых гистограмм для представления цветового содержимого изображений / Н. С. Костюкова // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2005. – Т. 45. - №1

86. Shangxuan, T. Scene Text Segmentation with Multi-level Maximally Stable Extremal Regions [Электронный ресурс] / T. Shangxuan, L. Shijian, S, Bolan L.T. Chew – Офиц. сайт. – National University of Singapore. – Режим доступа: http://www.comp.nus.edu.sg/~tians/papers/ICPR2014_Multi-levelmser_Tian.pdf, свободный

87. Smochina, C. Epithelial area detection in cytokeratin microscopic images using MSER segmentation in an anisotropic pyramid [Электронный pecypc] / C. Smochina, R. Rogojanu, V. Manta, W. Kropatsch – Офиц. сайт. – Institute of Computer Graphics and Algorithms. – Режим доступа: http://www.prip.tuwien.ac.at/people/krw/more/papers/2011/PRIB/Smochina2011c. pdf, свободный

88. Bolotina I. O., Kryoning K. V., Kvasnikov K. G., Sednev D. A., Sumtsova O. V. Acoustic Field Simulation of an Antenna Array at Scanning by the SPA Method for Modern Ultrasonic Testing Technologies // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 959-964

89. Bolotina I., Bulavinov A., Lider A., Sednev D., Shtaynbreher A. Ultrasonic inspection of spent nuclear fuel casks // Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81.

90. Кренинг М. Х., Демянюк Д. Г., Болотина И. О., Лидер А. М., Седнев Д. А. Методика идентификации контейнеров сухого хранилища с помощью ультразвукового исследования сварных швов // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 217-220

91. Krening M. K., Demyanyuk D. G., Sednev D. A., Lider A. M. Structural Fingerprints Of Containers With Nuclear Materials For Material Control And Accounting Purposes // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2 – P. 190-193

92. Krening M. K., Sednev D. A., Chumak D. V. Nondestructive Testing at Nuclear Facilities as Basis for The 3S Synergy Implementation // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2 – P. 194-197

93. Крёнинг Х. В., Демянюк Д. Г., Лидер А. М., Седнев Д. А. Применение ультразвукового метода неразрушающего контроля в целях учета и контроля ядерного материала // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – №. 2/2. – С. 237-240

94. Demyanuk, D., Kroening, M., Lider, A., Chumak, D., Sednev, D. Intrinsic fingerprints inspection for identification of dry fuel storage casks // ESARDA Bulletin. – 2013. – Vol. 50. – P. 79-86

95. Седнев Д.А., Шаравина С.В. Возможности идентификации конструкционных материалов на основе биометрических алгоритмов // Сборник тезисов «V Школа-конференции молодых атомщиков Сибири» – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2014. – С.65

96. Кренинг М. Х., Демянюк Д. Г., Болотина И. О., Лидер А. М., Седнев Д. А. Методика идентификации контейнеров сухого хранилища с помощью ультразвукового исследования сварных швов // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16-18 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 69-76

97. Krening M. K., Demyanyuk D. G., Lider A. M., Sednev D. A. Ultrasonic identification of dry intermediate storage casks // 52nd Annual Conference NDT 2013. Conference and Materials testing 2013 Exhibition: abstracts of papers, September 10-12, 2013. – Northampton: The British Institute of Non-Destructive Testing, 2013. – P. 1-9

98. Кренинг Х-М., Демянюк Д.Г., Лидер А.М., Седнев Д.А. Исследование самозащищенных уникальных идентификационных признаков // «Ядерные технологии – вызовы XXI века: нераспространение, разоружение и мирное применение атомной энергии»: материалы конференции. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2012. – С.108-109

99. Седнев Д. А. Методика идентификации внутреннеприсущих признаков материала для задач системы учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс]: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. / Д. А. Седнев. – Электрон. дан. – Томск: ТПУ, 2012 – Т. 3 – С. 55-56 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

100. Седнев Д.А. Методы неразрушающего контроля в целях учета и контроля ядерного материала // Современные проблемы технической физики: сборник тезисов и докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи; Томский политехнический университет. – Томск: ТПУ, 2011. – С.71-72.

101. Haworth, K.J. Medical Ultrasound Aberration Correction via Acoustic Droplet Vaporization and Time-reversal Acoustics / K.J. Haworth // ProQuest, University of Michigan Dissertation Publishing, 2011

102. Carcione, J.M. The exploding reflector concept for ground-penetratingradar modeling / J.M. Carcione, L.P. Feliciangeli, M. Zamparo // Annals of Geophysics. – 2002. – Vol. 45. – No. 3/4

103. Ibáñez, L. The ITK Software Guide / L. Ibáñez, H. Johnson, M. McCormick // Kitware Inc., 2005

104. Lorensen, W. E. Marching Cubes: A high Resolution 3D Surface
Construction Algorithm / W. E. Lorensen, H. E. Cline // Computer Graphics. – 1987.
– Vol. 21, - No. 4

105. Snyman, J.A. Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms / J.A. Snyman // Springer. – 2005

106. Szeleski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeleski // Springer. – 2010

107. Umeyama, S. Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns / S. Umeyama // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991. – Vol. 13/4

108. Weisstein E. W. Affine Transformation / E.W. Weisstein // MathWorld.- 2014

109. Zhang, Zh. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces / Zh. Zhang // International Journal of Computer Vision. – 1994. – Vol. 13/2

110. Zitová, B. Image registration methods / B. Zitová, J. Flusser // Elsevier,Image and Vision Computing. – 2003. – Vol. 21(11)