

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Демянюк Дмитрий Георгиевич

Официальные оппоненты: **Кербель Борис Моисеевич**, доктор технических наук, профессор Северского технологического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор кафедры «Электроника и автоматика физических установок».

Шевалдыкин Виктор Гаврилович, доктор технических наук, «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр» г. Москва, заведующий научно-методическим сектором.

Ведущая организация: Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева

Защита состоится «28» декабря 2015 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд.215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru:7777/council/916/worklist>

Автореферат разослан «04» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

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.

Национальные и международные организации прикладывают значительные усилия по разработке и совершенствованию систем и устройств индикации вмешательства. Согласно рекомендациям ГК «Росатом» по применению систем пломбирования считается, что отсутствуют официальные данные о пломбировочных устройствах, которые невозможно подделать. 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.

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

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

В связи с этим целью настоящей работы 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 **решить следующие задачи:**

1. 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 12X18H10T.

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.

Научная новизна 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 образцов сварных соединений, выполненных из аустенитной стали 12X18H10T;
- 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.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанная конструкция преобразователя применима для проведения исследований

широкого класса материалов в области материаловедения, дефектоскопии и дефектотрии. 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 «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов», 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:

1. 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 ресурса контейнеров с отработавшим ядерным топливом 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.

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

Личный вклад автора заключается в предложении конструкции спирального матричного датчика для получения наиболее полных качественных и количественных данных о структуре конструкционных материалов, использовании методов корреляционного анализа для установления идентичности УИП; разработке и реализации 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 представлены на всероссийских и международных 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 21 работе: 7 статьях в журналах из списка ВАК (в т. ч. 2 статьи в БД SCOPUS), 1 статье в зарубежном профессиональном рецензируемом 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрены использующиеся и перспективные системы пломбирования, проведен анализ их конструктивных особенностей. Анализ существующих систем пломбирования, применяемых в целях учета и контроля ядерных материалов, выявил значимые недостатки рассматриваемых систем. Изучены особенности структуры технологических и герметизирующих сварных соединений пенала с ОЯТ, показано, что принципы дактилоскопической идентификации могут быть использованы для установления идентичности сварного соединения. Изучены системы пьезоэлектрических преобразователей сигнала, которые входят в состав устройств ультразвукового контроля. Определена необходимость разработки специализированного преобразователя для целей акустической идентификации. Эффективное использование устройств УЗК для решения поставленных задач требует создания модели формирования и сравнения уникальных идентификационных признаков. На основании проведенного обзора литературных источников были определены основные требования к системе акустической идентификации.

Вторая глава отражает результаты разработки модели формирования и сравнения уникальных идентификационных признаков на основе

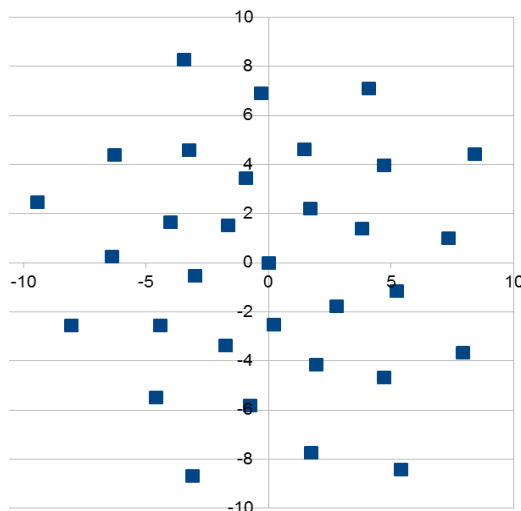
измеренных акустических данных, а также содержит основные сведения о конструкции спирального матричного преобразователя.

Литературный обзор показал, что наилучшие показатели чувствительности контроля могут быть достигнуты при использовании матричных фазированных антенных решеток. При этом, на данный момент, отсутствуют коммерчески доступные матричные решетки с апертурой достаточного размера для реализации алгоритма миграции данных. Матричная решетка с большой апертурой содержит большое количество элементов в соответствии с теоремой Котельникова. При значительных реконструируемых объемах требуемое количество элементов может превышать тысячу, что приводит к серьезным проблемам при распайке кабелей. Учитывая приведенные выше факты, в работе была предложена конструкция акустического преобразователя с разреженной апертурой.

Теоретически, случайное или спиральное распределение элементов решетки дает наилучшие результаты с точки зрения подавления артефактов, т.к. появляющиеся дифракционные помехи усредняются и пропадают. Распределение элементов спирали вычисляется с помощью следующей формулы (1):

1)

Каждый поворот элемента спирального распределения $\Delta\theta$ является иррациональным 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. Приращение радиуса каждого элемента Δr вычисляется в соответствии с необходимым диаметром датчика. На рисунке 1 показано теоретическое распределение элементов преобразователя.



X	Y	X	Y
0	0	-6.38	0.26
0.22	-2.51	4.71	-4.69
1.69	2.20	-0.32	6.90
-2.99	-0.53	-4.59	-5.50
2.78	-1.77	7.35	0.99
-0.92	3.43	-6.30	4.39
-1.75	-3.38	1.74	-7.74
3.82	1.39	4.07	7.11
-4.00	1.65	-8.05	-2.57
1.94	-4.15	7.91	-3.65
1.45	4.62	-3.46	8.27
-4.41	-2.56	-3.12	-8.68
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 1 – 5 МГц преобразователь – оптимизированная спиральная конструкция

Элемент с размером апертуры равным одной длине 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 звука в стали (5920 м/с), угол раскрытия акустического фронта достигает примерно 90° после преломления волны. Таким образом, максимальная зона покрытия от всех элементов решетки проявляется практически в момент вхождения акустического сигнала в контролируемый образец. Схема показана на рисунке 2. В радиальном направлении вся область от -180° до $+180^\circ$ покрывается практически полностью. Ограничения вносятся лишь геометрией призмы.

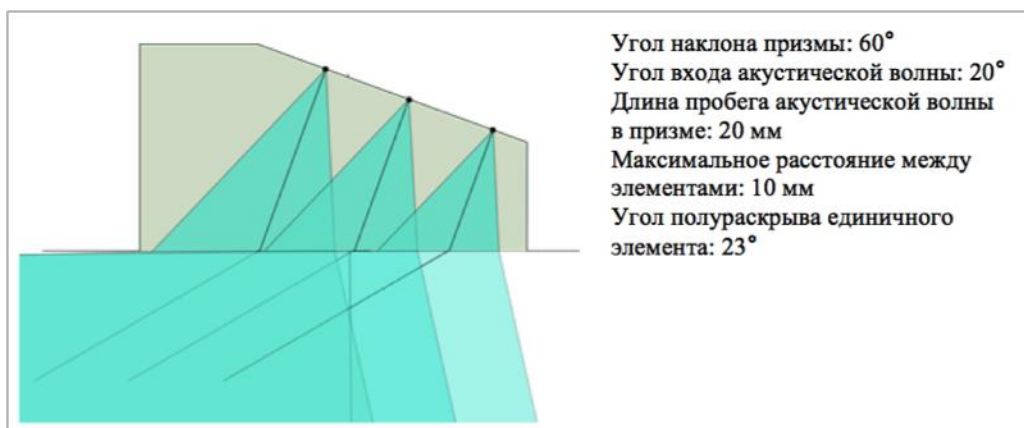


Рисунок 2 – Оценка покрытия сигнала

Использование призмы позволяет направлять акустическое поле в требуемую зону контроля, а также использовать поперечные волны, которые существенно более чувствительны к мелким отражателям, формирующим внутреннюю структуру сварного соединения. При помещении преобразователя на наклонную призму, которая направляет акустическое поле на корневую часть шва посредством преломления, система УЗК позволяет визуализировать весь объем сварного соединения, в том числе области корня. 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 для определения базовых параметров, таких как распределение чувствительности, область покрытия и возможность появления артефактов реконструкции. Взаимодействие точечного источника с акустической волной может быть смоделировано электродинамическим принципом трассировки лучей.

В работе проведено численное моделирование акустического поля с точечными отражателями. Апертура решетки – круглая, диаметр составляет

Продолжение Таблицы 1.

Описание датчика	матричная решетка с разряженной апертурой и постоянной чувствительностью в 360°
Скорость звука в призме	2,740 м/с
Задержка	0,55 мм
Число элементов/ размеры решетки (ДхШ)	32/1х1мм
Номинальная центральная частота	5 МГц
Допустимые пределы температуры	10–50°C, без перепадов
Допустимые пределы напряжения	320 В (дельта импульс), 240 В (прямоугольный импульс)

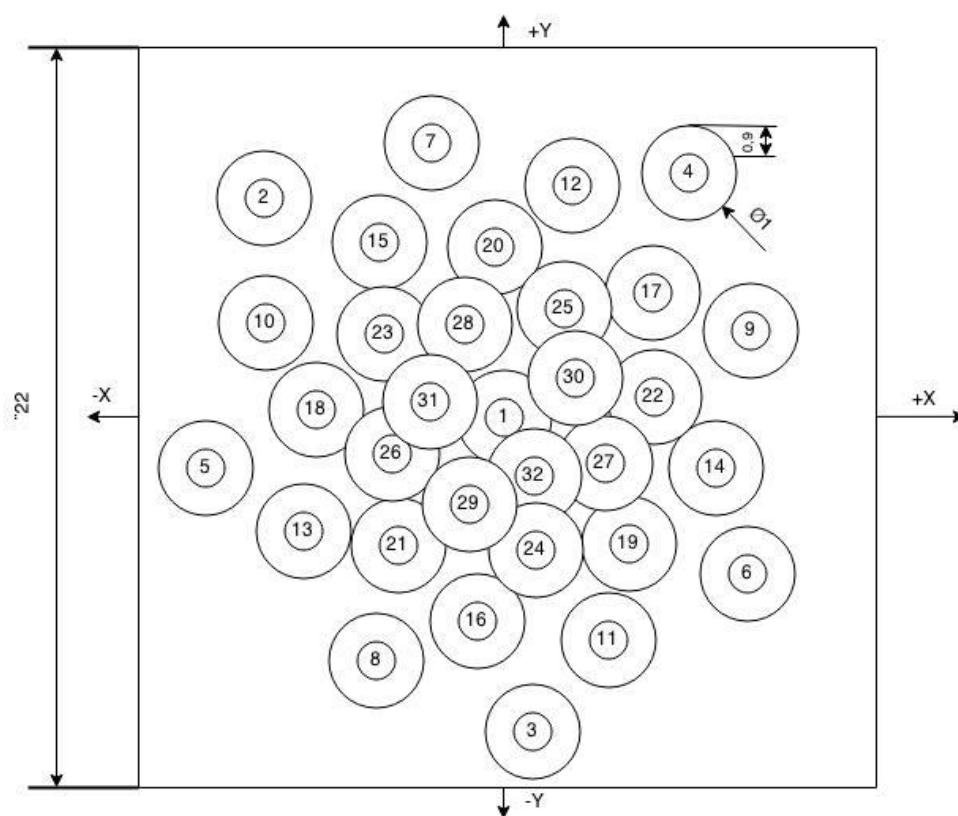


Рисунок 4 – Расположение элементов преобразователя

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, формируют набор экспериментально полученных А-разверток для разработанной модели формирования

уникальных идентификационных признаков (УИП). Модель представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Разработанная модель формирования УИП

Применение принципа разреженности элементов датчика, а также формирование синтетической апертуры, позволит использовать статический алгоритм миграции (САМ), 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.

Все полезные сигналы, полученные в целях акустической идентификации части изображения, динамические. 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 в отношении пространственного расположения и размера отражателей, что является внутреннеприсущей характеристикой зерен металла сварного соединения.

Согласно рисунку 5, второй этап разработанной модели – корреляционное сравнение полученных на первом этапе УИП. Сравнение уникальных признаков – это процедура установления соответствия между эталонным УИП и УИП, сформированным в результате повторного измерения. По результатам литературного обзора определено, что при

анализе отпечатков пальца традиционно применяется корреляционное сравнение. Метод корреляций является довольно сложным в биометрии из-за трудоемкой реализации и продолжительного времени действия алгоритма, но является эффективным для установления уровня корреляции бинарных изображений. Корреляционный метод сравнения относится к классу “гистограммных методов сравнения”, который включает в себя 4 основных алгоритма: корреляция, пересечение, хи-квадрат и расстояние Хеллингера.

Для выполнения задачи установления соответствия УИП в целях однозначной идентификации учетных единиц в работе было создано программное обеспечение, основой работы которого являются гистограммные методы сравнения изображений. Программное обеспечение разработано с использованием библиотек Qt/QML 5.3.1 и OpenCV 2.3.1.

Третья глава включает в себя описания экспериментальных образцов, лабораторной ультразвуковой многоканальной системы и методики снятия акустических данных с целью их последующей обработки с помощью предложенной модели формирования УИП.

Апробация модели осуществляется с помощью серии натуральных экспериментов. Эксперименты проведены с помощью трех различных акустических преобразователей: одноэлементный ПЭП, линейная ФАР и сконструированная в работе матричная решетка. Целью исследований было установить степень корреляции между сформированным эталонным и вновь измеренным УИП. Также производится моделирование типичных ошибок контроля, которые могут повлиять на результат процедуры идентификации.

Для проведения серии экспериментов получены контрольные образцы с ФГУП ФЯО ГХК. Образцы, имитирующие узлы пеналов ОЯТ, изготовлены из двух пластин различных размеров, соединённых стыковым сварным соединением. Пример типичного образца представлен на рисунке 6. Сварное соединение выполняется посредством автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. 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.

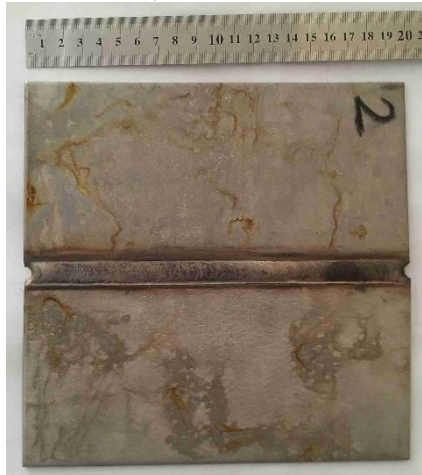


Рисунок 6 – Образец 6, вид сверху.

Эксперименты проводятся на лабораторной многоканальной ультразвуковой установке. Структурная схема представлена на рисунке 7. Фотографии установки представлены в тексте диссертации.



Рисунок 7 – Структурная схема лабораторной установки для УЗК сварных швов

Лабораторная установка была создана в МНОЛ НК ИНК, на базе блока ультразвуковой электроники «OPTUS», производства компании I-Deal Technologies GmbH. Блок представляет собой универсальный 128-канальный модуль с высокой пропускной способностью. Данная электроника может применяться для решения широкого круга задач автоматизированного ультразвукового контроля.

В состав установки вошел разработанный преобразователь, изготовленный силами сторонней организации (intelligeNDT, Германия) в соответствии с разработанными техническими требованиями. Изготовленный преобразователь представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – 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. Результаты определения номинальной частоты элементов матричной решетки представлены на рисунке 9.

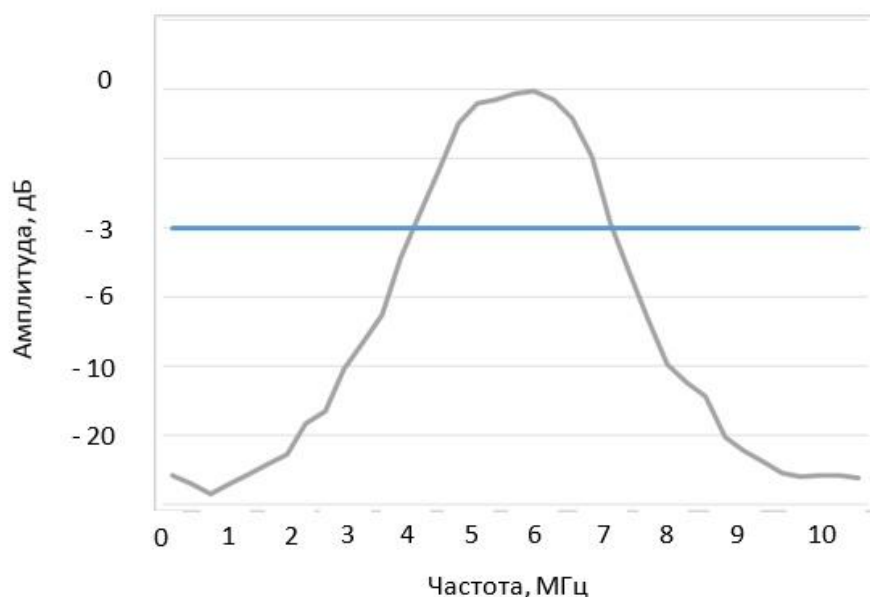


Рисунок 9 – Распределение частотного спектра, изготовленного датчика

На рисунке 9 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.

С целью получения достоверных данных, предложено четыре способа проведения процедуры УЗК: ручной контактный контроль, автоматизированное иммерсионное сканирование линейной ФАР, ручной контактный контроль матричным преобразователем и автоматизированное иммерсионное сканирование матричным преобразователем. Такой выбор методик обусловлен необходимостью сравнить промышленно используемые стандартные акустические датчики с разработанным матричным преобразователем.

Методика процедуры проведения идентификации предусматривает сравнение уровня корреляции данных снятых в одной позиции по разным измерениям, с разных позиций или разных образцов. Предложенный подход позволяет однозначно установить работоспособность выбранных алгоритмов корреляции. Помимо различных позиций снятия данных были смоделированы факторы, потенциально способные внести погрешность в измеряемый уровень корреляции. В качестве таких факторов выделяются: плохой акустический контакт, сдвиг или поворот преобразователя. Таким образом, было выделено шесть различных серий экспериментов: идентичная позиция на одном образце; различная позиция на одном образце; различные образцы; идентичная позиция на одном образце с моделированием плохого

акустического контакта; идентичная позиция на одном образце с моделированием поворота преобразователя; идентичная позиция на одном образце с моделированием сдвига преобразователя.

В четвертой главе проведено сравнение результатов, полученных в ходе проведения запланированных серий экспериментов на примере образцов сварных соединений, выполненных из аустенитной стали 12X18H10T.

По итогам проведения серий экспериментов согласно предложенным способам проведения процедуры УЗК можно сделать вывод о применимости предложенного метода и модели акустической идентификации сварных соединений. Результаты эксперимента «Идентичная позиция на одном образце» лежат в пределах 78,3 – 97,9%, что существенно выше порога совпадений в 65%, заданного на основе классической модели дактилоскопии, рассмотренной в литературном обзоре. Уровень корреляции эксперимента «Различные образцы» составляет 18,3-21%, что более чем на 50% отличается от корректной аутентификации и, в среднем, на 45% ниже заданного порога совпадений. Ручной контроль, в отличие от автоматизированного, показал низкие результаты в эксперименте «Различная позиция на одном образце». 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 «Идентичная позиция на одном образце с моделированием плохого акустического контакта», «Идентичная позиция на одном образце с моделированием поворота преобразователя», «Идентичная позиция на одном образце с моделированием сдвига преобразователя» 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 в автоматизированном и в ручном режимах.

Сравнение результатов эксперимента «Идентичная позиция на одном образце», проведенного разработанным матричным спиральным преобразователем в автоматизированном и ручном режимах, представлено на рисунке 10.

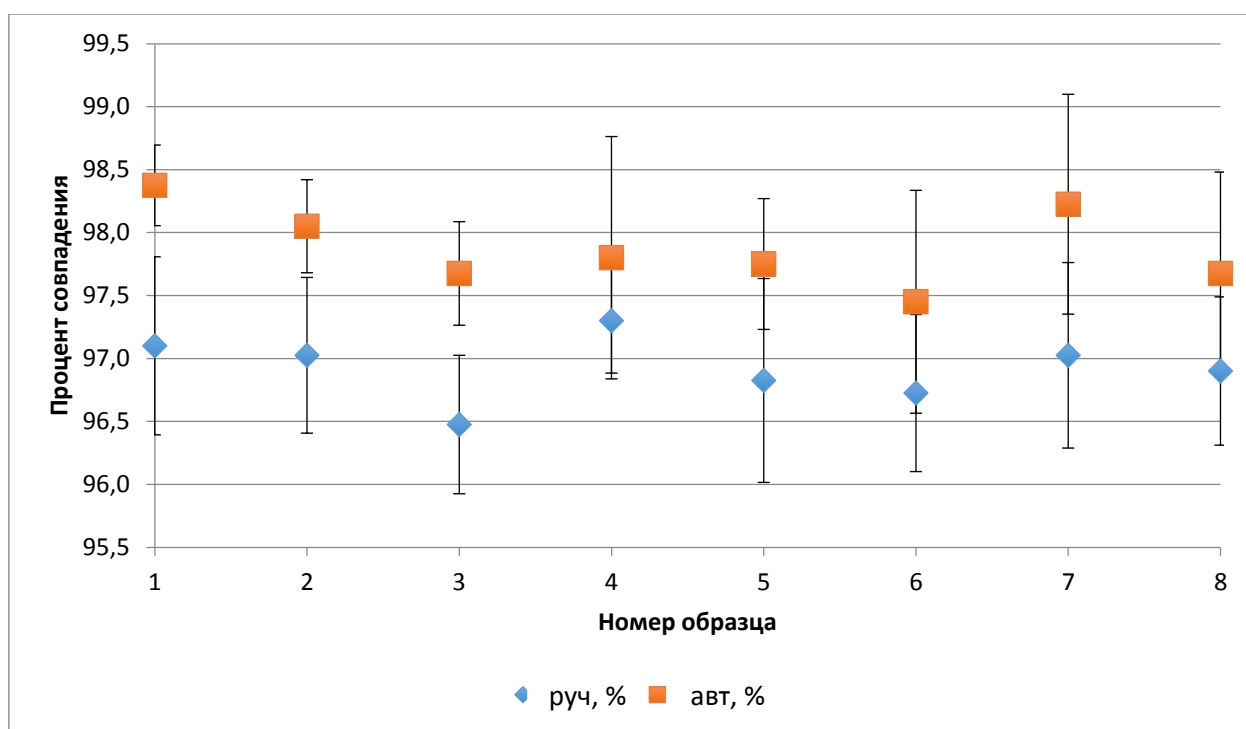


Рисунок 10 – Доля совпадений в опытах «Идентичная позиция на одном образце» для разработанного преобразователя в ручном и автоматизированном режимах.

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

Результаты сравнения эффективности работы для эксперимента «Идентичная позиция на одном образце» приведены в таблице 2. Условные обозначения в таблице 1 для методов корреляции: «1» - корреляция, «2» - пересечение, «3» - хи-квадрат, «4» - расстояние Хелингера.

Таблица 2 – Анализ эффективности различных методов корреляции

Тип преобразователя	Метод корреляции	1	2	3	4
Одноэлементный преобразователь	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
Линейная ФАР	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
Матричный преобразователь в автоматизированном режиме	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
Матричный преобразователь в ручном режиме	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

Разница в эффективности различных методов корреляции невысока и лежит в пределах 5%, что является допустимым. Как видно из таблицы 1 пересечение всегда приводит к получению наиболее точных результатов, поэтому данный метод может быть использован в дальнейшем в качестве единственного метода корреляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Результаты, полученные с помощью разработанного матричного преобразователя, показали наибольший уровень корреляции. Использование разработанного преобразователя, обладающего изотропной чувствительностью, позволяет компенсировать погрешности, связанные с поворотом и сдвигом преобразователя. Все предложенные методы корреляционного анализа подтвердили свою состоятельность. Лучшие результаты были получены во всех сериях экспериментов с помощью метода пересечения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФЦП «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, соглашение о предоставлении субсидии от «27» июня 2014 г. № 14.575.21.0048, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0048.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Bolotina I., Bulavinov A., Lider A., Sednev D., Shtaynbreher A. Ultrasonic inspection of spent nuclear fuel casks // Materials Science and Engineering – 2015 – Vol.81 – 012073
2. 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 [879409-2014]
3. 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 [1242612-2014]
4. 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 [28401-2014]
5. 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 [28501-2014]
6. Кренинг 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 [3312-2013]

7. 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 [2833-2012]

Публикации в других изданиях

1. Бороков 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 [439204-2015]
2. 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
3. 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
4. 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 научно-технической конференции – ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности». – Кемерово, 2014. – С.43-47.
5. Demyanuk, D., Kroening, M., Lider, A., Chumak, D., Sednev, D. Intrinsic fingerprints inspection for identification of dry fuel storage casks // ESARDA Bulletin. – 2013. – Т. 50. – p. 79-86
6. 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 [6289-2013]
7. 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 [35801-2014]
8. 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, ВЕЛИКОБРИТАНИЯ, September 10-12, 2013. - Northampton: The British Institute of Non-Destructive Testing, 2013 - p. 1-9 [11564-2013]
 9. 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 [8217-2012]
 10. 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 [8216-2012]
 11. 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.
 12. Седнев Д. А. Методика идентификации внутреннеприсущих признаков материала для задач системы учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012 - Т. 3 - С. 55-56 - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) [10809-2012]
 13. 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 Томского политехнического университета, 2011. – С.236-238.
 14. 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: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С.71-72.