

На правах рукописи

Салчак Яна Алексеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ  
ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
**Лидер Андрей Маркович**

Официальные оппоненты: **Клопотов Анатолий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Прикладной механики и материаловедения», профессор

**Бехер Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электротехника, диагностика и сертификация», доцент, заведующий научно-исследовательской лаборатории «Физические методы контроля качества»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится «12» декабря 2017 года в 15:00 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 научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

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



Шевелева Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Атомная энергетика (АЭ) является одной из наиболее перспективных отраслей, обеспечивающих производство безуглеродной электрической и тепловой энергии.

Но в то же время, одной из актуальных проблем АЭ является накопление большого количества отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). На сегодняшний день в нашей стране накоплено более 20000 тонн ядерного топлива, а ежегодно вырабатывается еще более 600 тонн ОЯТ. По условным расчетам можно сказать, что к 2030 году в России будет накоплено около 40000 тонн ОЯТ реакторов различного типа.

Для расширения возможностей по размещению топлива, а также осуществления перехода к замкнутому ядерно-топливному циклу, происходит активное развитие методов сухого хранения ОЯТ. В нашей стране предположительный срок размещения ОЯТ в хранилищах сухого типа достигает 50 лет. В связи с этим, одной из важнейших задач для атомной промышленности становится обеспечение безопасности при долговременном (бессрочном) хранении ОЯТ.

Строительство и запуск первого в России централизованного хранилища сухого типа производится на базе ФГУП ФЯО «Горно-химический комбинат» (ГХК). В настоящее время уже запущено две очереди предприятия, позволяющего размещать топливо как от реакторов большой мощности канальных (РБМК), так и водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Размещение ОЯТ осуществляется в специализированном пенале, представляющем собой герметичную стальную емкость. Герметизация при хранении обеспечивается свариванием крышки пенала с его корпусом.

Таким образом, проведение эффективного контроля качества данных герметизирующих сварных соединений, которые являются наиболее уязвимыми местами пенала, является наиболее значимым в целях обеспечения безопасности при хранении. При этом, в целях сохранения целостности изделия после диагностики, могут быть применены только неразрушающие методы контроля, включающие в себя магнитные, тепловые, ультразвуковые, радиографические и другие методы.

На данный момент в атомной энергетике наиболее распространено применение радиографического метода контроля (РК). Это связано с длительной практикой применения данного метода и сопутствующим созданием нормативных документов, регламентирующих проведение инспекций сварных соединений объектов атомной энергетике. Но в то же время, проведение дефектоскопии с применением рентгеновского излучения сопряжено с рядом недостатков. Наиболее существенными являются риск возможной повышенной радиационной нагрузки на персонал и неспособность выявления дефектов типа трещина и непровар, если плоскость их раскрытия не совпадает с направлением просвечивания. Кроме того, для наибольшей чувствительности применяются рентгеновские трубки, которые не обладают достаточной проникающей способностью, что важно в случае

производственного контроля пеналов для хранения ОЯТ на этапе до механической обработки в связи с чрезмерной толщиной заготовок.

В этой связи возникает потребность в развитии альтернативных технологий контроля, которые могут быть использованы наравне или в дополнение к радиографии. Примером таких методов, являются развивающиеся ультразвуковые (УЗ) технологии. Современные технологии ультразвукового контроля (УЗК) позволяют проводить эффективную оценку качества с точностью сопоставимой результатам РК.

**Степень разработанности темы.** Основной сложностью при применении методов УЗК является то, что результаты измерений позволяют проводить лишь относительную количественную оценку обнаруживаемых дефектов. Для сопоставления индикаций, получаемых при ультразвуковой инспекции с реальными размерами несплошностей необходимо наличие калибровочных образцов, которые соответствуют по своим акустическим свойствам и конструкционным особенностям контролируемому объекту. Кроме того, традиционные методы ультразвуковой диагностики позволяют получение результатов только в виде зависимости изменения амплитуды волны от времени прохождения. Это может приводить к большим погрешностям в связи с тем, то решение по интерпретации результатов возлагается на оператора.

Благодаря значительному развитию традиционных методов и появлению способов, основанных на применении фазированных антенных решеток (ФАР), стало возможным точное определение размеров и позиционирование различного типа дефектов путем построения трехмерных изображений внутренней структуры контролируемых объектов.

Реконструкция реальных изображений дефектов, при наборе большого количества акустических данных с использованием фазированных решеток, достигается путем применения специализированных алгоритмов математической обработки. Такой подход лежит в основе акустической голографии, как одного из методов ультразвуковой дефектометрии.

В России вопросы применения ультразвуковых методов для осуществления дефектометрии начали развиваться достаточно давно. Например, коллективы под руководством Вовилкина А.Х., Бадаляна В.Г. занимаются исследованиями вопросов применения голографических методов с целью повышения корреляции между условными и реальными дефектами контролируемых объектов. На основе их исследований было предложено использование фокусированных нерасходящихся пучков, озвучивающих дефекты по технологии Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT). На сегодняшний день под руководством данных ученых совместно с академиком РАН Алешиным Н.П. создана фирма «Научно-производственный центр неразрушающего контроля ЭХО+», на базе которой активно ведутся работы по созданию автоматизированных ультразвуковых систем с применением методов ультразвуковой голографии. Так, созданная ими система Авгур широко применяется для контроля качества сварных соединений

энергоблоков атомных станций. Работа, проделанная указанными научными коллективами, показала, что применение методов ультразвуковой голографии и методов синтезированной аппретуры может быть эффективно при контроле аустенитных сталей.

Акустическая голография представляет метод измерений, позволяющий без использования фокусированных датчиков, на основе применения принципов волновой интерференции восстанавливать трехмерные изображения внутренней структуры объектов контроля. Ее принципы совпадают с методами ультразвуковой томографии, применение которой также развивается выдающимися коллективами исследователей в области ультразвукового контроля нашей страны.

Так, например, под руководством Самокрутова А.А. и Шевалдыкина В.Г. на базе Научно-производственной фирмы "АКС" ("Акустические Контрольные Системы") происходит создание передовых систем ультразвукового томографического контроля различных объектов. Основным принципом работы таких систем является многоракурсное сканирование заданной точки пространства с последующей когерентной пространственно-временной обработкой сигналов и присвоением результатам определённого цвета на получаемых изображениях.

Учитывая вышесказанное, можно сказать, что ультразвуковая томография является одним из актуальных направлений исследований в области неразрушающего контроля. А создание методики, реализующей ее применение для контроля качества сварных соединений пеналов для сухого хранения ОЯТ, позволит избежать ограничений, обусловленных применением существующих радиографических методов.

Разрабатываемая в работе база данных дефектов, учитывающая особенности объекта контроля и применяемых режимов сварки, обеспечивает возможность осуществления количественной оценки несплошностей на основе полученных индикаций ультразвуковой томографии. Кроме того, в рамках диссертационной работы предлагается создание автоматизированного сканирующего устройства для инспекции сварных соединения пенала, что существенно повысит производительность и точность контроля по сравнению с традиционными ультразвуковыми методами.

**Объектом исследования** является безопасность сухого хранения ОЯТ в рамках осуществления перехода к замкнутому ядерно-топливному циклу.

**Предметом исследования** являются методики ультразвукового контроля качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ из аустенитных сталей для реакторов типа РБМК-1000 (далее-пенал для хранения ОЯТ).

**Цель работы** – разработка средства и методики автоматизированного контроля качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 посредством ультразвуковой томографии.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1) Анализ и классификация дефектов, возникающих при аргонно-дуговой сварке конструкционного материала пенала для хранения ОЯТ;

2) Формирование характеристических признаков для интерпретации индикаций ультразвуковой томографии, позволяющих определить тип дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ;

3) Разработка методики ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ;

4) Выбор и обоснование параметров измерительного и акустического трактов для инспекции сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ;

5) Проведение экспериментальных исследований образцов с реальными дефектами на лабораторной установке ультразвуковой томографии;

6) Верификация экспериментальных результатов ультразвуковой томографии методом радиографического контроля;

7) Разработка и апробация средства автоматизированного сканирования пенала для хранения ОЯТ с целью проведения ультразвуковой томографии.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1) База данных дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ реактора типа РБМК-1000;

2) Методика автоматизированного контроля качества пенала для хранения ОЯТ на основе трехмерной визуализации результатов ультразвуковой томографии;

3) Результаты экспериментальной оценки качества образцов, предоставленных ФГУП ФЯО «ГХК» с помощью ультразвуковой томографии, подтвержденные соответствующими данными радиографического контроля.

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

- Разработана методика ультразвуковой томографии пеналов для хранения ОЯТ реакторов РБМК-1000;

- Разработан способ анализа и интерпретации результатов ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ;

- Установлено соответствие между реконструированными результатами ультразвуковой томографии пеналов для хранения ОЯТ и данными их радиографического контроля.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что ее результаты внедрены в производственный процесс ОАО «СибАтомСервис», а также в учебный процесс кафедры физико-энергетических установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, что подтверждено соответствующими актами.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что разработана и апробирована методика контроля для проведения исследований технического состояния пеналов для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000. Полученные результаты позволяют осуществить ее внедрение на базе централизованного хранилища ГХК.

Применение разработанной методики на реальных пеналах ОЯТ даст возможность расширения созданной БД дефектов, характерных для сварных соединений изделий из аустенитной стали, что позволит в дальнейшем усовершенствовать методику для проведения ультразвуковой томографии других компонентов атомной энергетики, изготавливаемых из данного материала.

Практическая значимость также подтверждается выполнением автором в качестве соисполнителя следующих научно-исследовательских работ, посвященных разработке и применению ультразвуковых методов контроля сварных соединений в атомной энергетике:

1) 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 ОЯТ на базе метода ультразвуковой томографии, соглашение о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.575.21.0048, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0048.

2) Государственное задание «Наука» Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.3683.2017/4.6.

3) Государственное задание «Наука» Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.6342.2017/8.9.

**Методы исследования.** При проведении исследований использовались методы цифровой обработки сигналов ультразвукового контроля, методы реконструкции ультразвуковых томографических данных, методы аналитического расчета, математического анализа и статистических методов обработки информации.

**Достоверность полученных в работе результатов** обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, применением комплексного подхода и современной элементной базы при разработке методики ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ, а также при создании лабораторной установки для проведения эксперимента, сопоставлением данных полученных в работе с результатами, полученными другими исследователями при использовании радиографического контроля.

**Личный вклад автора** заключается в формировании критериев классификации и создании базы данных дефектов сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ; разработке и апробации методики ультразвуковой томографии, включая проведение экспериментов, обработку полученных данных и проведение сравнительного анализа для подтверждения достоверности результатов; проведение экспериментальной апробации разработанного автоматизированного манипулятора ультразвуковой томографии пеналов для хранения ОЯТ.

**Апробация работы и публикации:** материалы диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск,

2015; Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», Москва, 2015; Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее, IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 2015; 2015 International Congress on Ultrasound, Метц, 2015; The International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Сан-Франциско, 2016; VIII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2017; IV Международная конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, Новосибирск, 2017.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 21 работах: 8 статьях в журналах из списка ВАК (в т. ч. 6 статьи в БД SCOPUS), а также в 13 материалах сборников трудов российских и международных конференций. Получен патент РФ.

**Структура и объем диссертационной работы:** диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка используемой литературы. Общий объем диссертации 144 страниц, включая 100 рисунков, 12 таблиц и список использованных источников из 107 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика, обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи работы, обозначены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрены особенности сухого хранения отработавшего ядерного топлива, приведены основные типы используемых контейнеров для хранения ОЯТ, проведен анализ их конструктивных особенностей и обозначено наличие сварных соединений, как основной зоны при проведении контроля качества. Рассмотрены существующие методы неразрушающего контроля качества сварных соединений, указаны возможности применения технологий ультразвуковой томографии пеналов для хранения ОЯТ. Проанализированы основные аспекты применения ультразвукового контроля сварных соединений, определены особенности обработки акустического сигнала, позволяющие получение трехмерных изображений внутренней структуры объектов контроля. Обозначены преимущества применения многоэлементных излучателей с целью осуществления цифровой фокусировки звукового поля в заданной точке объема. Рассмотрены принципы сканирования и визуализации данных контроля по методу цифровой фокусировки или Digitally Focused Array (DFA).

Во **второй главе** отражены результаты разработки методики для контроля качества на основе применения методов ультразвуковой томографии, состоящей из нескольких основных частей. На рисунке 1 представлена общая структура разработанной методики.



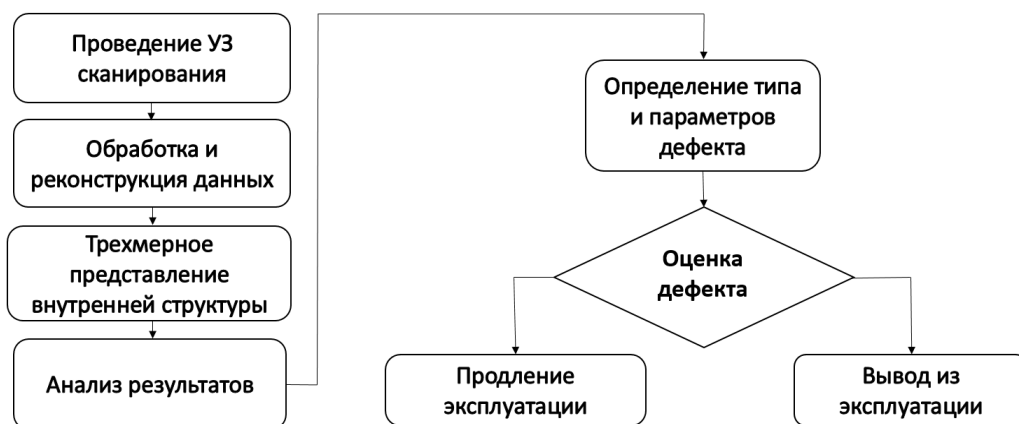


Рисунок 1 – Структура методики ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ

Содержатся основные сведения об особенностях материала и режиме сварки пенала для хранения ОЯТ. На основе этих данных разработана классификация основных типов дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ, которые необходимо зафиксировать. Она включает такие типы несплошностей как газовые поры, шлаковые и вольфрамовые включения, несплавления, непровары и трещины. Разработаны и рассчитаны требования к максимально допустимым размерам и расположению обозначенных типов дефектов. На основе проведенных расчетов разработана и создана база данных (БД) дефектов.

Кроме возможности определения, является ли обнаруженная несплошность при ультразвуковом контроле дефектом или нет (Рисунок 2,а), БД также предоставляет характеристики для разработки стандартного образца предприятия (СОП) в случае изменения объекта контроля (Рисунок 2,б).

а) окно «Журнал инспектора»; б) окно БД «Характеристика СОП»

Рисунок 2 – Представление результатов согласно разработанной БД при помощи ПО

Во второй главе приведена оценка значений предельно допустимой нагрузки сварного соединения пенала для хранения ОЯТ с целью определения

достоверности разработанных требований, включенных в БД дефектов. Для это было определено значение напряжения в бездефектном шве пенала относительно площади его сечения равное 4,1 МПа. При этом значение рабочей нагрузки к сварному соединению при равноускоренному поднятии будет равно:  $F(a=0) = 4,36 \text{ МН}$ .

Предельное значение напряжений в пенале при максимально допустимых размерах включений, согласно разработанной БД, не снижается и равно пределу прочности основного металла  $\sigma_B^{(ом)} = 530 \text{ МПа}$ , а рабочее значение напряжения  $\sigma = 177 \text{ МПа}$ . Также приведена зависимость изменения напряжений в сварном соединении при наличии непровара. Показано, что сварной шов нечувствителен к данному типу и дефектов. Предельное значение допустимых напряжений снижается прямо пропорционально по отношению к увеличению доли поперечного сечения сварного шва, соответствующей непровару. Определено, что максимально возможное неполное проплавление снижает прочность сварного соединения незначительно.

Таким образом, показано, что для достоверной оценки качества и принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации пенала достаточно провести сравнение с требованиями, включенными в разработанную БД.

В качестве входных данных для БД используются количественные характеристики несплошностей. Для этого осуществляется анализ трёхмерных воксельных данных, получаемых в результате томографической реконструкции объёма сварного шва методом DFA. Результатом реконструкции является построение изображений, каждый элемент которых соответствует значению при фокусировке синтезированной апертуры в соответствующей точке объёма.

Приводится классификация индикаций ультразвуковой томографии в соответствие с типовыми дефектами пенала для хранения ОЯТ. Она включает наличие необходимых характеристик несплошностей, таких как: положение в объёме; форма и ориентация; геометрические размеры.

Кроме того, данная глава содержит порядок интерпретации полученных индикаций. Сформулированы характеристические признаки, используемые для оценки индикаций на ультразвуковых изображениях: пространственное положение; амплитуда; площадь; пространственная протяжённость. На рисунке 3 и на рисунке 4 показана классификация несплошностей по параметрам пространственная протяжённость и площадь соответственно.

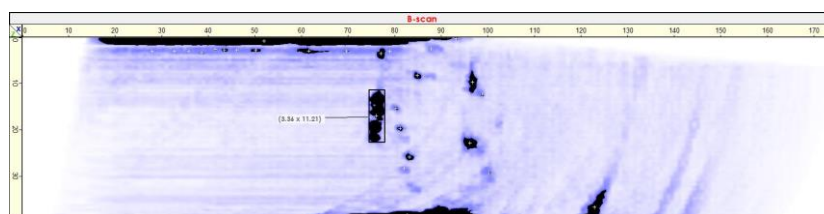


Рисунок 3 – Классификация непровара по пространственной протяженности и геометрическому положению

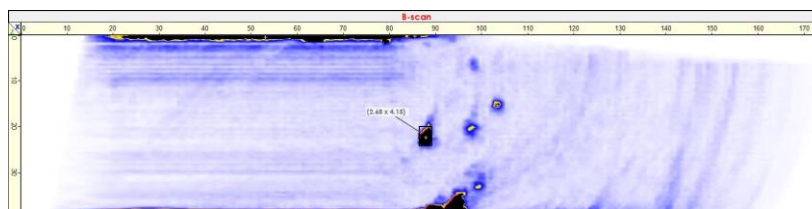


Рисунок 4 – Классификация ультразвуковых индикаций по площади

Разработанный способ обнаружения и распознавания дефектов заключается в анализе томографических данных. Путем определения минимального порогового значения амплитуды из трехмерной реконструкции выделяется индикация для анализа. В дальнейшем происходит ее оценка, включающая определение центра, размера и расположения. Также важным параметром является решение о необходимости группировки нескольких индикаций в зависимости от расстояния между ними.

**В третьей главе** приводятся сведения о выборе, расчете и обосновании параметров измерительной аппаратуры, а также параметров метода сканирования для проведения дальнейшей апробации разработанной методики.

Для апробации методики была выбрана автоматизированная лабораторная сканирующая система ультразвуковой томографии, состоящая из нескольких основных модулей.

Описываются основные характеристики, влияющие на выбор параметров оборудования акустического тракта и метода. Приведены соответствующие расчеты. Установлена необходимость применения ультразвукового наклонного преобразователя для генерации поперечных волн, с углом наклона призмы равном  $60^\circ$ , частотой 7,5 МГц, имеющим вид линейной фазированной решетки из 8-ми элементов (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры преобразователя

Параметр	Значение
Частота, МГц	7,5
Время волны в ПЭП, мм	16
Размеры элемента, мм	2,5
Количество элементов	8
Угол призмы, $\beta^\circ$	46
Угол ввода, $\alpha^\circ$	60
Длина волны, мм	0,4
Тип волны	Поперечные
Скорость волны в ОК, м/с	3200

Для обоснования выбора метода сканирования проведены расчёты параметров диаграммы направленности (ДН) с углом раскрытия равным  $4^\circ$  согласно следующей формуле:

$$\varphi = \arcsin \frac{n \cdot c}{f \cdot a}, \quad (1)$$

где  $n$  – коэффициент учитывающий форму пьезопластины (0,61 – для круглых; 0,5 – для прямоугольных);  $c$  – скорость волны в среде;  $f$  – частота;  $a$  – радиус пьезопластины.

В ходе выполнения работы также была рассчитана траектория прохождения волны в структуре сварного соединения с учетом его геометрических характеристик, это позволило обосновать выбор траектории сканирования по типу «меандр».

Произведен геометрический расчет шага сканирования с учетом угла раскрытия пучка ультразвукового поля, в соответствии с существующими требованиями и геометрическими параметрами пена для хранения ОЯТ. Было выявлено, что для обеспечения прозвучивания шва по всей глубине необходимо пять точек проведения сканирования, с шагом  $S_x = 1,7$  мм. Разработанная схема сканирования представлена на рисунке 5, а ее параметры приведены в Таблице 2.

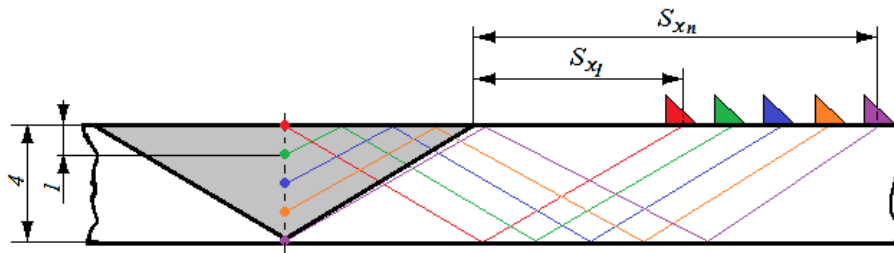


Рисунок 5 – Разработанная схема контроля сварного соединения пена для хранения ОЯТ реактора типа РБМК-1000

Таблица 2 – Параметры сканирования

№	Глубина пересечения с осью сканирования, мм	Область сканирования, мм	Положение преобразователя, мм
1	0	0 – 0,6	7,3
2	1	0,4 – 1,6	9,0
3	2	1,4 – 2,6	10,7
4	3	2,4 – 3,6	12,4
5	4	3,4 – 4	14,1

В дополнение к геометрическому расчету, был также проведен расчет, учитывающий угол раскрытия ДН, размер элемента линейного преобразователя и угол наклона акустической оси при контроле.

$$S_n = X_1(1 + 2 \cdot \operatorname{tg}\theta/\sin 2\alpha)^{n-1}, \quad (2)$$

$$S_x = 1 + 2 \cdot \frac{\operatorname{tg}\theta}{\sin 2\alpha} = 1 + \frac{2 \cdot 0,32}{\sin 120} = 1,74 \text{ мм}. \quad (3)$$

При этом  $X_1$  соответствует тому, что ультразвуковой преобразователь должен размещаться в околошовной зоне, в данном случае на расстоянии равном половине длины валика усиления в 17 мм.

В направлении вдоль сварного соединения перемещение должно производиться не более, чем на половину размера длины преобразователя, для того, чтобы происходило перекрытие ультразвукового поля в данном направлении, и соответственно был просканирован весь объем соединения. В качестве шага перемещения датчика вдоль сварного шва было выбрано значение  $S_y = 10$  мм, так как преобразователем является линейная фазированная решетка с 8 элементами и длиной одного элемента в 2,5 мм. Полная схема сканирования по типу «меандр» представлена на рисунке 6.

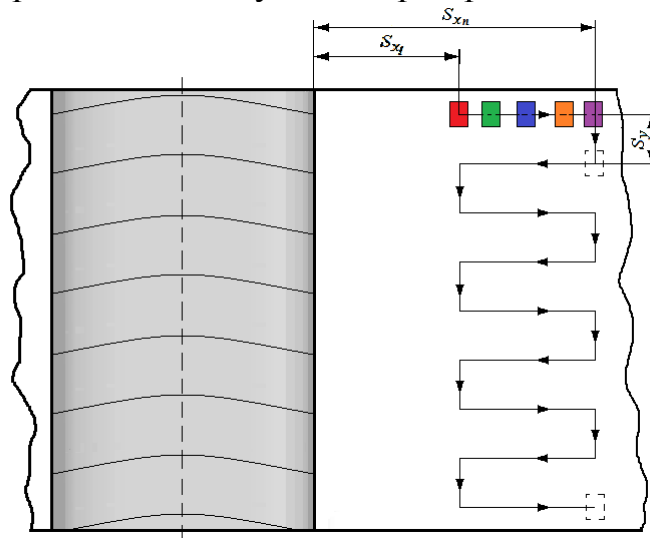


Рисунок 6 – Сканирование сварного шва объекта контроля по траектории «меандр»

Описаны особенности аппаратного обеспечения лабораторной установки, которая состоит из следующих модулей (Рисунок 7): измерительного и акустического трактов, манипулятора и блока управления манипулятором, а также блока определения координат.

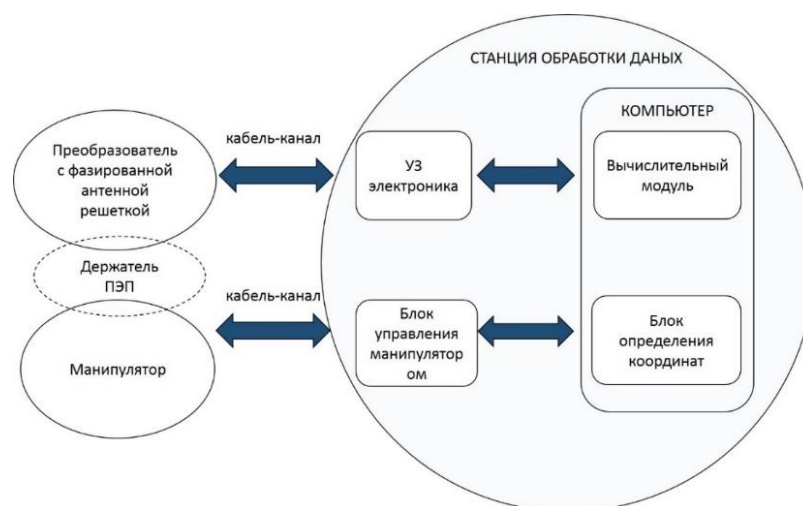


Рисунок 7 – Структурная схема лабораторной установки для УЗК сварных швов

Объект измерений сканируется при помощи трёх-осевого манипулятора (Рисунок 8). Данные записываются с учётом положения датчика, координаты которого отслеживаются с помощью блока определения координат. Обеспечивается трехмерное позиционирование, а информация об актуальном положении считывается в реальном масштабе времени, что дает возможность оперативной корректировки режима измерений. Все ультразвуковые данные сохраняются вместе с их местоположением (координатами), что позволяет осуществлять реконструкцию двух- и трёхмерных изображений.

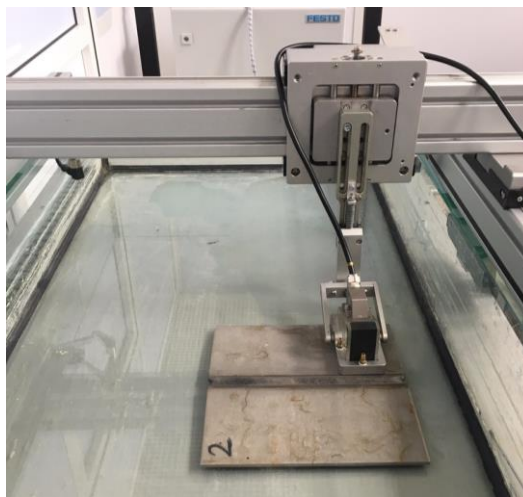


Рисунок 8 – Сканирование экспериментального образца

Блок управления манипулятором представляет собой отдельное устройство, интегрированное в систему проведения измерений и получения данных посредством кабельного соединения. Также обеспечена связь с блоком определения координат. Обработка и хранение данных осуществляется при помощи персонального компьютера. ПО обладает возможностью реализации ультразвукового контроля по технологии цифровой фокусировки сигнала DFA и предоставлять данные в виде разверток и в виде трехмерной реконструированных изображений. Происходит совмещение изображений



слоёв контролируемого объёма, которые в процессе контроля составляют в трёхмерное представление объекта контроля. В третьей главе описан алгоритм взаимодействия основных модулей ПО.

**В четвертой главе** приведены итоги проведения экспериментальной апробации на образцах, предоставленных ФГУП ФЯО «ГХК», которые полностью соответствуют по своим структурным свойствам и особенностям осуществления сварки реальному пеналу для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000.

В качестве референтного метода анализа был выбран радиографический контроль. Результаты проведения РК на экспериментальных образцах были предоставлены Горно-химическим комбинатом. Рассмотрены наиболее наглядные результаты, полученные при измерениях, и сопоставлены их с результатами радиографии. Они позволили обнаружить наличие дефектов типа непровар и включение в различных образцах.

Так, по результатам ультразвукового контроля образца, являющегося элементом обечайки пенала, был обнаружен дефект, являющийся непроваром сварного соединения. На рисунке 9 представлено сопоставление полученных результатов контроля (С-развертка) с результатами радиографии. На рисунке 10 представлена томография найденного дефекта.

Так как непровар по сути представляет собой полость, то уровень пройденного рентгеновского излучения при его наличии будет выше, что обуславливает затемнение на рентгеновской плёнке.

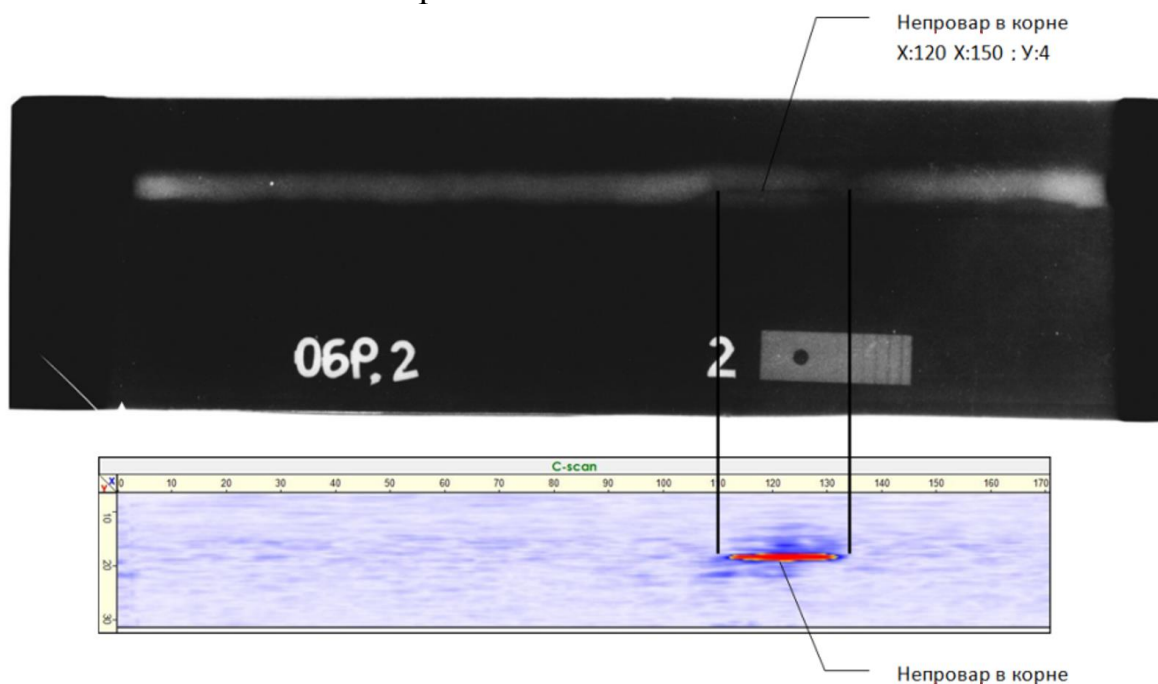


Рисунок 9 – Сопоставление результатов УЗК и РК обечайки пенала

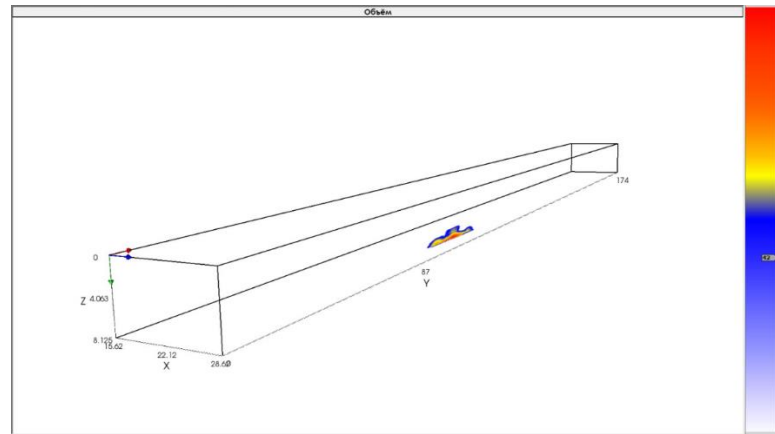


Рисунок 10 – Томография дефекта обечайки пенала

На изображениях, полученных при помощи предлагаемой методики ультразвукового контроля, индикации, соответствующие объемным включениям, имеют небольшую протяженность в трех пространственных направлениях и располагаются между индикациями от границ сварного соединения. Наглядно это показано на результатах измерений образца, соответствующего кольцу пенала (Рисунок 11).

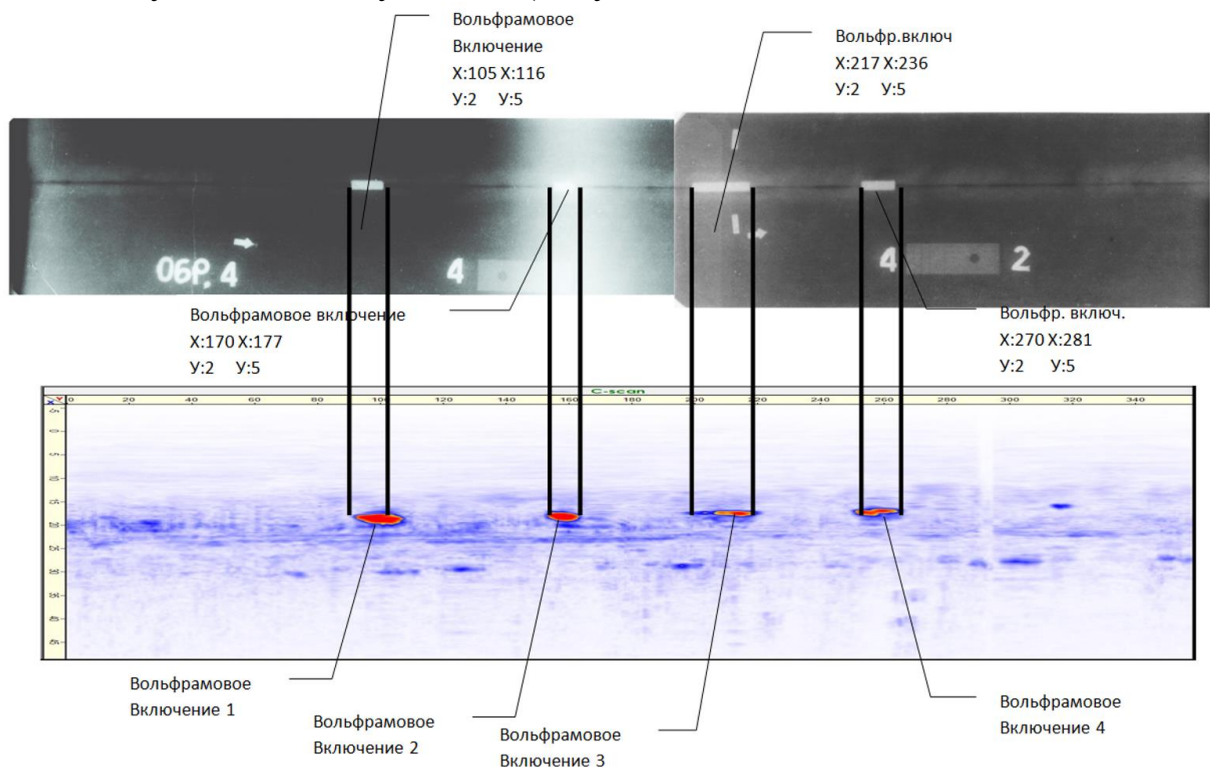


Рисунок 11 – Сопоставление индикаций от вольфрамовых включений, обнаруженных УЗК и РК элемента кольца пенала

Результаты эксперимента были сопоставлены с результатами радиографического контроля образцов проведенными предварительно.



В четвертой главе также рассматривается разработанная модель системы сканирования и ее апробация. Основным элементом системы является специализированный манипулятор, позволяющий осуществлять сканирование реального пенала для хранения ОЯТ как в продольном, так и в круговом направлении. Полученные результаты сканирования лабораторной модели пенала подтверждают эффективность разработанного решения.

В его состав входят следующие модули и системы:

- несущая рама;
- система фиксации несущей рамы;
- навесной модуль сканирования;
- система окружного перемещения навесного модуля сканирования;
- система осевого перемещения сканера;
- система подачи рабочей среды.

На рисунке 12 представлен автоматизированный сканирующий манипулятор для контроля модели пенала для хранения ОЯТ. А пример результатов, полученные при инспекции лабораторного макета пенала представлен на рисунке 13.

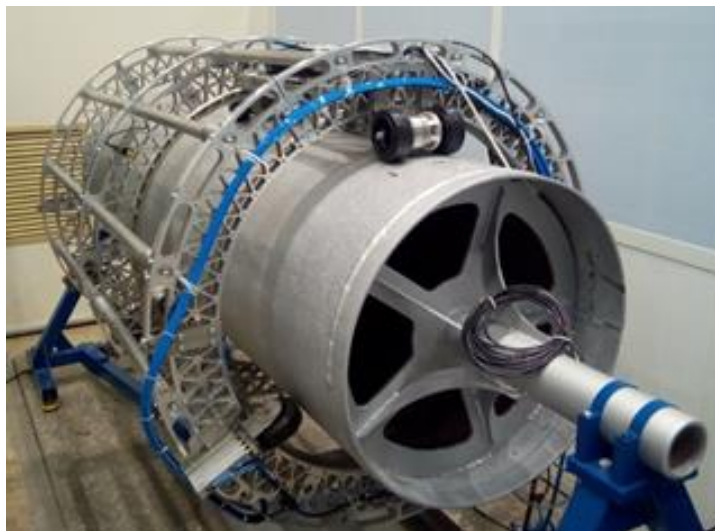


Рисунок 12 – Автоматизированная сканирующая система ультразвуковой томографии для пенала для хранения ОЯТ

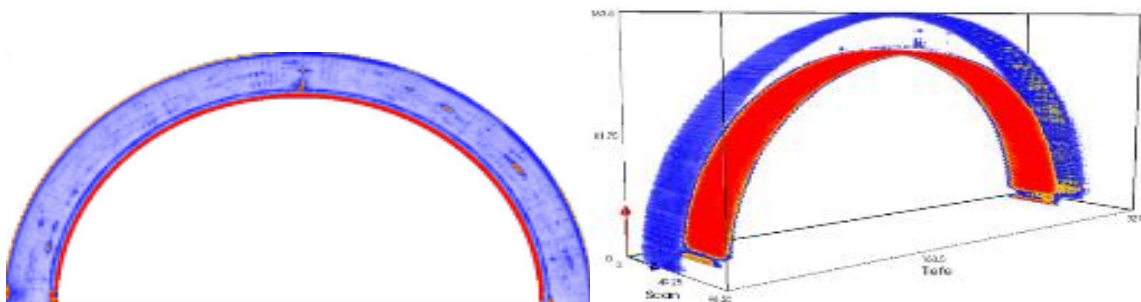


Рисунок 13 – Результаты ультразвуковой томографии модели пенала для хранения ОЯТ разработанным сканирующим манипулятором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработана БД сварных соединений пеналов с ОЯТ в соответствии с нормативными требованиями. Реализованная в программном обеспечении БД дефектов содержит всю необходимую информацию о возможных типах дефектов сварного соединения пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000, а также требования, которые позволяют принять решение о допустимости обнаруживаемых несплошностей. Кроме того, она предоставляет оператору информацию о характеристиках СОП в случае изменения ОК.

2) Определены типы и размеры присутствующих в образцах дефектов и установлено их соответствие требованиям нормативно-технической документации. Основными типами дефектов, которые необходимо зафиксировать, обозначены газовые полости, включая поры; шлаковые включения; металлические включения; несплавления; непровары и трещины. Представлена оценка степени влияния дефектов на возникновение дополнительных напряжений в сварном соединении, которое отвечает за герметизацию между крышкой и корпусом, а также их влияния на предельно допустимую нагрузку. Установлено, что наличие максимально допустимых, согласно разработанной БД, несплошностей в различных конфигурациях незначительно влияет на предельно допустимые нагрузки соединения, что подтверждает надежность критериев, установленных созданной БД.

3) Разработана методика оценки качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ реакторов РБМК-1000 на основе трехмерной визуализации результатов ультразвуковой томографии. Она включила в себя разработку способа интерпретации получаемых данных ультразвуковой томографии, на основе которых при использовании БД возможно провести оценку качества сварных соединений пеналов. Кроме того, для разработки методики был проведен расчет и обоснование параметров метода и аппаратуры для проведения сканирования посредством ультразвуковой томографии. Для апробации методики была выбрана автоматизированная лабораторная сканирующая система ультразвуковой томографии, состоящая из измерительного и акустический трактов, манипулятора, блока управления манипулятором, а также блока определения координат. Установлена необходимость применения ультразвукового наклонного преобразователя для генерации поперечных волн, с углом наклона призмы равным  $60^\circ$ , частотой 7,5 МГц, имеющим вид линейной ФАР из 8-ми элементов. Также рассчитана траектория прохождения волны в структуре сварного соединения с учетом его геометрических характеристик, это позволило обосновать выбор траектории сканирования по типу «меандр» с шагом сканирования в 1,7 мм.

4) Проведены эксперименты на контрольных образцах пеналов для хранения ОЯТ ФГУП ФЯО «ГХК», которые полностью соответствуют по своим свойствам реальному пеналу для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000. Достоверность полученных результатов подтверждена

соответствующими данными РК, средняя квадратичная погрешность составила 26,3 %. Можно утверждать, что разработанная методика способна обеспечить эффективную оценку качества сварных соединений пеналов для сухого хранения ОЯТ при условии наличия соответствующей автоматизированной сканирующей системы.

5) Разработано и прошло апробацию автоматизированное сканирующее устройство, позволяющее дальнейшую интеграцию методики на производственных линиях. Основным элементом системы является специализированный манипулятор, позволяющий осуществлять сканирование реального пенала для хранения ОЯТ как в продольном, так и в круговом направлении. Полученные результаты сканирования лабораторной модели пенала подтверждают возможность проведения эффективной ультразвуковой томографии рассматриваемого ОК в режиме реального времени.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Наука» Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.3683.2017/4.6.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Salchak, Y.A. Dry storage casks monitoring by means of ultrasonic tomography / Y.A. Salchak, A.N. Bulavinov, R.V. Pinchuk, A.M. Lider, I.O. Bolotina, D.A. Sednev // *Physics Procedia*, 2015. – V. 70. – P. 484-487.

2. Salchak, Y.A. The Classification of Weld Seam Defects for Quantitative Analysis by means of Ultrasonic Testing / Y.A. Salchak, T.S. Tverdokhlebova, S.V. Sharavina, A.M. Lider // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2016. – V. 132. – Article number: 012027.

3. Salchak, Y. A. Frequency-domain imaging algorithm for ultrasonic testing by application of matrix phased arrays / Y. A. Salchak, D. O. Dolmatov, R.V. Pinchuk // *MATEC Web of Conferences: EDP Sciences*, 2017. – V.102. – Article number: 01015.

4. Salchak, Y.A. Principles of construction of ultrasonic tomographs for solution of problems of nondestructive testing in mechanical engineering / Y.A. Salchak, I.O. Bolotina, A.N.Bulavinov, R.V. Pinchuk // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V.124. – Iss. 1. – Article number. 012149.

5. Salchak, Y.A. Quantitative analysis of the SNF storage cask by means of ultrasonic testing / Y. A. Salchak, D. A. Sednev, S.V. Sharavina, T. S. Tverdokhlebova, A.M. Lider // *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Book of Abstracts*. – 2016. – P. 1362-1366.

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

7. Салчак, Я.А. Повышение эффективности ультразвукового контроля пеналов хранения ОЯТ / Я. А. Салчак, В. В. Абрамец, Д. А. Седнев, В.И. Мацеля, И.Н. Сеелев // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60 – № 9/2.

8. Салчак, Я.А. Методы оценки технического состояния пеналов для хранения отработавшего ядерного топлива / Я.А. Салчак, В.В. Абрамец, Д.А. Седнев, А.М. Лидер // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ». – 2017. – Т. 6 – № 3. – С. 207-213.

*Публикации в других научных изданиях*

1. Salchak, Y. A. Dry Storage Casks Monitoring by Means of Ultrasonic Tomography / Y. A. Salchak, A. N. Bulavinov, R. V. Pinchuk, A. M. Lider, I. O. Bolotina, D. A. Sednev // Conference ICU, Abstract Book, Metz, France. – 2015. – P. 259-260.

2. Салчак, Я.А. Количественная оценка напряжений сварных швов контейнеров с ОЯТ с различными типами дефектов / Е.П. Седанова, Я.А. Салчак, Д.А. Седнев // VIII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сб. Ш67 тез. докл. (17-19 мая 2016 г., г. Томск). –Томск: Изд-во. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – С. 138.

3. Салчак, Я.А. Разработка стандартизированной базы дефектов сварных соединений пеналов для сухого хранения ОЯТ / Т.С. Твердохлебова [и др.] // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов (14-16 октября 2015г., г. Томск). – Томск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 70.

4. Салчак, Я.А. Количественный ультразвуковой анализ за счёт внедрения стандартизированной базы данных дефектов сварных соединений / Т.С. Твердохлебова [и др.] // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» в 3 т. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – Т. 1. – С. 214-218.

5. Салчак, Я.А. Количественная ультразвуковая оценка дефектов сварных соединений объектов атомной энергетики / Т.С. Твердохлебова [и др.]// Инновации в атомной энергетике: сб. докладов конференции молодых специалистов (25-26 ноября 2015 г., Москва). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2015. – С. 516-523.

6. Салчак, Я.А. Моделирование типичных дефектов пеналов для сухого хранения ОЯТ / Т.С. Твердохлебова, Я.А. Салчак, А.М. Лидер // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов (19-21 октября 2016 г., г. Северск). – Томск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 172.

7. Салчак, Я.А. Методы оценки технического состояния пеналов для хранения ОЯТ / В.В. Абрамец [и др.] // VI Школа-конференция молодых

атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов (14-16 октября 2015г., г. Томск). – Томск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 147.

8. Салчак, Я.А. Методика ультразвукового контроля сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ / В.В. Абрамец [и др.] // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» в 3 т. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – Т.1. – С. 265.

9. Салчак, Я.А. Совершенствование алгоритмов обработки акустического сигнала в целях повышения эффективности оценки качества компонентов томной энергетики / В.В. Абрамец, Я.А. Салчак, Д.А. Седнев // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. – Томск. – 2016. – С. 262.

10. Салчак, Я.А. Разработка методики УЗК в целях обеспечения технологической безопасности объектов АЭ / В.В. Абрамец [и др.] // Инновации в атомной энергетике: сб. докладов конференции молодых специалистов (25-26 ноября 2015 г., Москва). – М: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2015. – С 608-621.

11. Салчак, Я.А. Повышение эффективности ультразвукового контроля пеналов для хранения ОЯТ / В.В. Абрамец [и др.] // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов (19-21 октября 2016 г., г. Северск). – Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 199.

12. Салчак, Я.А. Разработка математической модели реконструкции сварного соединения на основе акустических данных / В.В. Абрамец, Я.А. Салчак, Д.О. Долматов // VIII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сб. Ш67 тез. докл. (17-19 мая 2017 г., г. Томск). – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – С. 164 с.

13. Salchak, Y. A. Ultrasonic signal processing in order to improve the quality of assesment of nuclear industry's components / Y. A. Salchak, V. V. Abramets, D. A. Sednev, A. M. Lider // European Nuclear Society Conference: Proceedings, Warsaw, October 9-13, 2016. – Brussels: ENS. – 2016. – P. 77-78.