

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к. ф-м. н. Лидер А.М.

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| ГЛАВА 1 МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПЕНАЛОВ ДЛЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОЯТ | 10 |
| 1.1 Сухое хранение ОЯТ..... | 11 |
| 1.2 Основные характеристики существующих пеналов для сухого хранения ОЯТ..... | 12 |
| 1.3 Методы оценки качества сварных соединений пеналов сухого хранения ОЯТ | 18 |
| 1.4 Общие аспекты применения УЗК сварных соединений..... | 26 |
| 1.5 Способы визуализации результатов УЗК | 28 |
| 1.6 Основные принципы ультразвукового томографического контроля пенала для хранения ОЯТ..... | 33 |
| 1.7 Технология цифровой фокусировки сигнала DFA | 38 |
| 1.8 Выводы к главе 1 | 42 |
| ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛА ДЛЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОЯТ | 44 |
| 2.1 Создание БД дефектов пенала для хранения ОЯТ..... | 45 |
| 2.1.1 Характеристика конструкционного материала пенала для хранения ОЯТ..... | 45 |
| 2.1.2 Особенности сварки аустенитных сталей..... | 46 |
| 2.1.3 Анализ требований к качеству сварных соединений пенала для хранения ОЯТ | 48 |
| 2.1.4 Классификация основных дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ | 50 |
| 2.1.5 Программная реализация БД дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ | 57 |
| 2.2 Способ обнаружения и распознавания дефектов на основе индикаций ультразвуковой томографии | 61 |
| 2.2.1 Классификация индикаций ультразвуковой томографии в соответствии с типовыми дефектами пенала для хранения ОЯТ | 63 |
| 2.2.2 Порядок интерпретации несплошностей материала..... | 65 |
| 2.2.3 Разработка способа обнаружения и распознавания дефектов | 69 |
| 2.3 Оценка значения предельно допустимой нагрузки сварного соединения пенала для хранения ОЯТ..... | 75 |
| 2.3.1 Напряжения в бездефектном шве | 75 |
| 2.3.2 Напряжения в сварном соединении при наличии дефектов | 77 |
| 2.4 Выводы к главе 2..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| ГЛАВА 3 АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОЯТ | 82 |
| 3.1 Расчет и обоснование параметров проведения ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов | 82 |
| 3.1.1. Определение параметров аппаратуры | 82 |
| 3.1.2. Определение параметров сканирования | 85 |
| 3.2 Описание аппаратуры измерительного тракта | 94 |
| 3.3 ПО для получения и реконструкции результатов контроля по методу DFA | 96 |
| 3.4 Выводы к главе 3 | 97 |
| ГЛАВА 4 ПРОВЕДЕНИЕ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ПЕНАЛА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОЯТ | 99 |
| 4.1 Результаты ультразвуковой томографии сварных соединений | 99 |
| 4.2 Автоматизированная сканирующая система для ультразвуковой томографии пенала для хранения ОЯТ | 107 |
| 4.3 Вывод к главе 4 | 112 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 114 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 116 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 117 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Требования к качеству сварных соединений согласно нормативным документам | 126 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Требования к сварным соединениям пенала для хранения ОЯТ | 128 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Описание организации внутримашинной информационной базы | 131 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г Конструкторская документация системы ультразвукового томографического контроля | 140 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения в учебный процесс | 143 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения в производственный процесс | 144 |

ВВЕДЕНИЕ

АЭ является одной из наиболее перспективных отраслей, обеспечивающих производство безуглеродной электрической и тепловой энергии.

Но в то же время, ее развитие приводит к накоплению большого количества ОЯТ. На сегодняшний день в нашей стране накоплено более двадцати тысяч 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 [1].

Для расширения мощностей по размещению топлива, а также осуществления перехода к замкнутому ЯТЦ, 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 [2].

Строительство и запуск первого в России централизованного хранилища производится на базе ФГУП ФЯО «ГХК». В настоящее время уже запущено две очереди предприятия, позволяющих размещать топливо как от реакторов типа РБМК, так и ВВЭР-1000 [3]. В целях обеспечения ядерной и радиационной безопасности размещение ОЯТ осуществляется в специализированном пенале, представляющим собой герметичную стальную емкость. Герметизация при хранении обеспечивается свариванием крышки пенала с его корпусом [4].

Таким образом, наиболее значимым является проведение эффективного контроля качества данных герметизирующих сварных соединений, которые являются наиболее уязвимыми местами пенала [5]. 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 метода РК. Это связано с длительной практикой применения данного метода и сопутствующим созданием нормативных документов, регламентирующих проведение инспекций сварных соединений объектов атомной энергетики. 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, а также 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 связи с этим возникает потребность в развитии альтернативных технологий контроля, которые могут быть использованы вместо или в дополнение к радиографии. Примером таких методов являются развивающиеся ультразвуковые технологии. Современные технологии УЗК позволяют проводить эффективную оценку качества с точностью сопоставимой с результатами РК [6].

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, что решение по интерпретации результатов возлагается на оператора.

Благодаря значительному развитию традиционных методов и появлению способов, основанных на применении ФАР, стало возможным точное определение типов, размеров и положения дефектов путем построения трехмерных изображений внутренней структуры контролируемых объектов.

Реконструкция реальных изображений дефектов при измерении акустических сигналов с использованием ФАР 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 Вopilкина А.Х., Бадаляна В.Г. занимаются исследованиями вопросов применения голографических методов с целью повышения корреляции между условными и реальными дефектами контролируемых объектов [7]. На основе их исследований было предложено использование фокусированных нерасходящихся пучков, озвучивающих дефекты по технологии SAFT. На сегодняшний день под руководством данных ученых совместно с академиком РАН Алешиным Н.П. на базе «Научно-производственный центр неразрушающего контроля ЭХО+» 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 может быть эффективно при контроле аустенитных сталей [8-11].

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

Так, например, под руководством Самокрутова А.А. и Шевалдыкина В.Г. на базе Научно-производственной фирмы «АКС» происходит создание передовых систем ультразвукового томографического контроля различных объектов. Основным принципом работы таких систем является многокурсное сканирование заданной точки пространства с последующей когерентной пространственной-временной обработкой сигналов и присвоением результатам определённого цвета на получаемых изображениях [12-14].

Учитывая вышесказанное, можно сказать, что на сегодняшний день ультразвуковая томография является наиболее актуальным направлением исследований в области неразрушающего контроля. Создание методики, реализующей ее применение для контроля качества сварных соединений пеналов сухого хранения ОЯТ, позволит избежать ограничений, обусловленных применением существующих радиографических методов. Разрабатываемая в работе БД дефектов, учитывающая особенности ОК 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 соединений 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 ЯТЦ.

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

Целью настоящей работы является 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 аргонодуговой 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 РК.

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

Положения, выносимые на защиту:

- БД дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000.
- Методика автоматизированного контроля качества пенала для хранения ОЯТ на основе трехмерной визуализации результатов ультразвуковой томографии.

- Результаты экспериментальной оценки качества образцов предоставленных ФГУП ФЯО «ГХК» с помощью ультразвуковой томографии, подтвержденные соответствующими данными РК.

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 РК.

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, представленными в Приложениях Д и Е.

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.

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 РК.

Личный вклад автора заключается в формировании критериев классификации и создании БД 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; проведении 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, Сборник научных трудов, IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 2015; 2015 International Congress on Ultrasound, Metz, Франция, 2015; The International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Сан-Франциско, США, 2016.

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

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПЕНАЛОВ ДЛЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОЯТ

На сегодняшний день основным направлением в рамках развития атомной отрасли выступает перспектива замыкания ЯТЦ с целью получения возможности повторного применения урана-238, а также других элементов. Накопление неиспользованного природного урана происходит как на стадии обогащения, так и после выгрузки ОЯТ. В состав ОЯТ входят уран-238, образовавшийся плутоний-239, также оставшиеся неиспользованный уран-235, трансурановые элементы и осколки деления. После завершения работы в реакторе ТВЭЛ, объединённые в ТВС, обладают высоким остаточным тепловыделением, а также высокой активностью в связи с наличием распадающихся осколков деления и трансурановых элементов. Поэтому сразу после выгрузки ТВС помещают в приреакторные бассейны выдержки для обеспечения возможности дальнейшего обращения с ОЯТ. Так, например, топливо может быть транспортировано для последующего захоронения. В таком случае реализуется работа по принципу открытого ЯТЦ.

Кроме этого, возможна также переработка ОЯТ. В России заводы по переработке располагаются на предприятиях ПО «Маяк» (Челябинск) и на ФГУП ФЯО «ГХК» (Железногорск). В Европе переработкой занимается небольшое количество стран: Франция (завод Cogema, AREVA), Англия (завод в Селлафилде, THORP).

Переработка ОЯТ в перспективе позволяет осуществлять закрытие ЯТЦ, что помимо увеличения потенциального срока использования АЭС является экономически выгодным уже на сегодняшний день из-за удорожания добычи урана и разработки новых месторождений.

В то же время, ПО «Маяк», на базе которого на сегодняшний день находится единственный завод по переработке топлива, способно обеспечить обращение с количеством только до 400 тонн ОЯТ, а ежегодно с Российских АЭС вырабатывается около 600 тонн. Кроме того, данное предприятие не обеспечивает переработку всей широкой номенклатуры типов существующего топлива. Так, например, работы по осуществлению переработки ОЯТ реакторов типа РБМК и ВВЭР-1000 начались только в последние два года [15-16]. На российских АЭС большая часть ОЯТ приходится на данные типы реакторов. На ГХК технологии, которые позволят осуществление переработки топлива РБМК и ВВЭР все еще находятся на стадии разработки. Из-за этого за годы работы АЭ происходило перенаполнение имеющихся приреакторных хранилищ, так же, как и централизованного мокрого хранилища на базе ГХК. В 2011 году оно было заполнено на 90 %.

Подобная ситуация привела к острой необходимости развития и внедрения передовых технологий для создания централизованного хранилища «сухого» типа. В 2001 году было принято решение о его реализации на базе ГХК, с учетом имеющегося опыта данного

предприятия, и о последующем запуске работ по переработке [17]. Завод по переработке будет рассчитан на мощности до 1500 тонн ОЯТ в год. Таким образом, станет возможным, помимо размещения ОЯТ со станций нашей страны, также и прием на переработку ОЯТ с реакторов советского дизайна других стран (Украина, Армения, Болгария, Чехия и др.). Но главной целью, безусловно, остается замыкание ЯТЦ.

1.1 Сухое хранение ОЯТ

Сухой способ хранения обеспечивает размещение топлива на более длительный период, чем мокрое (50-100 лет) и обладает множеством преимуществ.

В первую очередь, это значительно снижает затраты как на этапе строительства, так и в процессе эксплуатации. Кроме того, в данном случае для отведения тепла используется конвекция воздуха, что позволяет избежать негативного влияния жидкости на оболочки ТВС. Снижается образование дополнительных жидких РАО, а также нет необходимости в обеспечении системами по очистке и водоподготовке. Появляется дополнительная гибкость в отношении выбора места для хранения с возможностью увеличения числа пеналов в хранилище по мере необходимости.

Как уже было сказано, в России активно ведутся работы, необходимые для перехода к сухому хранению и замкнутому циклу. Данные работы осуществляются в рамках «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП). На данном этапе на базе ФГУП ФЯО «ГХК» уже запущены обе очереди для ОЯТ РБМК-1000 и ВВЭР-1000 (ХОТ 2). В 2017 году планируется запустить комплекс опытно-демонстрационного центра с исследовательскими камерами, предназначенный для переработки до 5 тонн ОЯТ. Продолжаются работы по созданию опытно-демонстрационного центра (второй пусковой комплекс) по переработке ОЯТ со сроком завершения в 2020 году [18].

Для реализации сухого типа хранения ТВС размещаются в специализированных герметичных конструкциях, заполненных либо воздухом, либо инертным газом. Сборки могут быть расположены в железобетонных массивах либо в специальных стальных пеналах.

Безусловно, к рассматриваемым пеналам предъявляют строгие требования. Они должны обеспечивать отвод остаточного тепловыделения от топлива, радиационную безопасность и механическую устойчивость. Для того чтобы мощность дозы излучения была безопасной для персонала объекта, населения и окружающей среды, пеналы должны иметь достаточную толщину стенки. Для обеспечения ядерной безопасности внутри пенала размещаются специальные поглощающие элементы, и ТВС располагаются в дистанцирующих решетках на достаточном изоляционном расстоянии. Технологические решения по обеспечению ядерной и

радиационной безопасности пеналов ОЯТ разных производителей фактически могут быть одинаковы. Расчетное обоснование каждого конкретного типа пенала для каждого конкретного вида топлива с учетом места расположения хранилища рассматривается в комплексе [19].

Помимо этого, крайне важным аспектом является обеспечение технической безопасности, которое позволяет своевременно удостовериться в целостности и надежности конструкций, а именно пеналов для непосредственного размещения ТВС. Это достигается путем применения эффективных методов диагностики качества материалов пенала, которые будут рассмотрены далее.

1.2 Основные характеристики существующих пеналов для сухого хранения ОЯТ

При сухом типе хранения ОЯТ необходимо обеспечение трех основных принципов безопасности [20]:

- охлаждение топлива для предотвращения перегрева, связанного с радиоактивным распадом;
- защита персонала и населения от радиационного излучения;
- предотвращение возможности возникновения аварии.

Пеналы сухого хранения позволяют реализовать два первых принципа без использования охлаждающей жидкости или механизированных систем. Защита от радиации обеспечивается благодаря материалам пенала, чаще всего это могут быть бетон, чугун, сталь. Контроль за критическим состоянием обеспечивается наличием дистанцирующей решётки.

Производство пеналов для сухого хранения и транспортировки ОЯТ в различных странах началось достаточно давно. Так, например, наиболее известные фирмы-производители пеналов Holtec International (США), NAC International (США), Transnuclear (AREVA, Франция), General Nuclear Systems (Германия). В основном они производят изделия с двойным назначением как для транспортировки, так и для хранения, в связи с низким уровнем необходимости долгосрочного «сухого» хранения [21-24].

Раньше всего производство пеналов для сухого хранения началось в США, еще в конце 70-х годов. В этот период началось проектирование систем для сухого хранения ОЯТ в пеналах, в том числе двойного назначения. Такие конструкции в рамках работы также будем называть контейнерами.

Примерно в это же время развитием технологий сухого хранения начала заниматься французская компания Transnuclear (AREVA), они производят контейнеры типа NUHOMS, начиная с 1990 года, и совершенствуют его до сегодняшнего дня (Рисунок 1) [25].

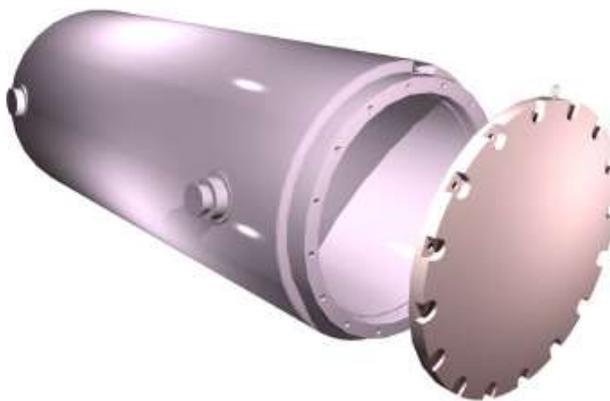


Рисунок 1 – Современный вид пеналов NUHOMS OS200

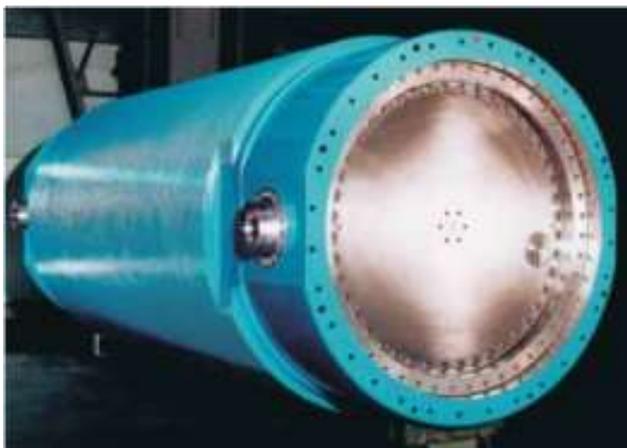
Пеналы данного типа состоят из двух стальных цилиндрических оболочек, к которым приваривается крышка и дно. Также внутри этих оболочек располагается свинец, который обеспечивает защиту от гамма-радиации. Такой контейнер применяется во множестве стран, в том числе и в США для топлива легководных и кипящих ВВЭР.

Значительную долю мирового рынка занимают пеналы компании General Nuclear Systems (GNS), Inc., страна производитель – Германия. Помимо Германии они эксплуатируются в таких странах, как Чехия, Бельгия, США, Швейцария и др. Конструкции данной фирмы впервые были размещены для хранения в 1983 году. На сегодняшний день контейнеры их совместного производства с чешским заводом SKODA типа CASTOR и CONSTOR изготавливаются для реакторов типа РБМК -1500, ВВЭР-440,1000 [26].

Корпуса контейнеров CASTOR RBMK-1500 и CONSTOR RBMK-1500 имеют систему герметичных крышек (закрытие на болтах и сваркой соответственно). Конструкция контейнеров обеспечивает безопасное и надежное хранение.

CASTOR представляет собой монолитный контейнер, выполненный из сверхпрочного чугуна, с прикручиваемой болтами двойной крышкой, в котором ведется контроль давления, а охлаждение осуществляется механизировано. В стенках контейнера расположен полиэтиленовый материал для нейтронной защиты. Такие контейнеры используются в Чехии (Рисунок 2, а).

CONSTOR представляет собой сэндвич-структуру из стали, крышка у данного типа контейнера выполнена из прокатной стали, в качестве защиты от облучения между стенками находится армированный бетон. Такой тип контейнеров применяется, например, в Литве, где первая загрузка произошла в 1999 году (Рисунок 2, б).



а)



б)

а) CASTOR; б) CONSTOR

Рисунок 2 – Пеналы для сухого хранения ОЯТ производства компании GNS

При эксплуатации металлических пеналов или контейнеров основным недостатком является подверженность развитию дефектов в сварных соединениях данных изделий. Так, например, возможно возникновение пластических деформаций указанных участков, в связи с нагрузками при размещении пеналов. Кроме того, изначально, качество сварного шва может быть снижено за счет возникновения дефектов структуры, как МКК, в связи с нарушениями технологических режимов сварки.

Ранее предполагалось, что в будущем будет осуществлено захоронение ОЯТ. Поэтому требовалось поддержание высокого качества в течение 20 лет [27]. Соответственно, материалы и конструкции пеналов не были рассчитаны на использование в течение более длительного периода, также, как и отсутствовала возможность мониторинга их качества. Недостаточная толщина защитной кладки может привести к повышению риска радиационного облучения в случае нарушения целостности пенала. В России было принято решение о создании хранилища «сухого типа», которое предполагает размещение пеналов под землей в стационарной бетонной кладке. К изготавливаемым сегодня пеналам предъявляются требования по обеспечению сохранности до 50 лет, с возможным продлением до 100 лет согласно стратегиям различных стран [28]. В целях обеспечения безопасности, необходимо своевременно проводить мониторинг состояния пеналов даже после того, как они помещаются в бетонную защиту.

Разработки контейнеров для ОЯТ и РАО ведутся с 80-х годов. Производство транспортировочных контейнеров типа ТУК осуществляется под руководством ОАО «КБСМ» совместно с ФГУП «ГИ «ВНИПИЭТ», ОАО «Петрозаводскмаш», ОАО «ЦНИТМАШ». На сегодняшний день ОАО «КБСМ» совместно с рядом предприятий разработало серию ТУК (ТУК-104, 109, 108/1, 121 и др.) [29]. Для обоснования экономической эффективности при

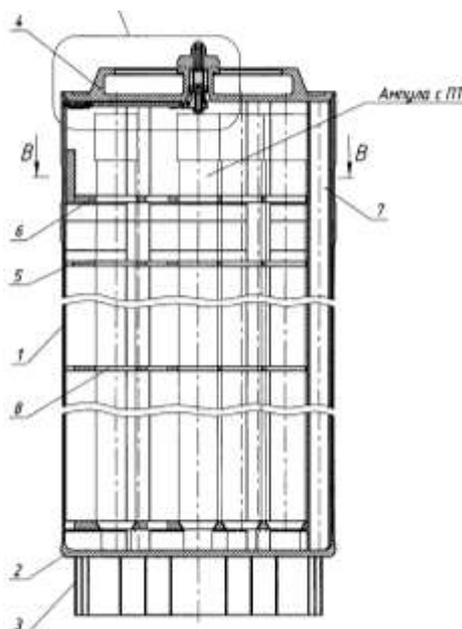
создании данных конструкций, как и зарубежных аналогов, предусматривалось их двухцелевое использование.

Для того чтобы снизить стоимость затрат на транспортировку и хранение, было принято решение о разработке металлобетонных контейнеров вместо полностью металлических. Их стоимость была ниже в несколько раз, а также позволяла осуществлять хранение и последующую транспортировку без перетаривания. Но, так как ранее не предполагалось долгосрочное сухое хранение ОЯТ, данные конструкции не отвечали всем необходимым на сегодняшний день требованиям [30].

В зарубежной практике сухое хранение ОЯТ осуществляется в открытых воздушных пространствах с целью отведения тепла и снижения дозы излучения. Пеналы располагаются свободно на открытых площадках или внутри специализированных помещений [31]. В связи с чем сам контейнер для хранения должен обеспечивать защиту от радиационного излучения персонала и окружающей среды. В основном это связано с вероятностью их эксплуатации и необходимо при транспортировке. Конструкции типа метало-бетонного типа отвечают данному требованию.

При разработке проекта по созданию хранилища «сухого типа» в России, экономически целесообразным решением было выбрано хранилище со специализированным залом, в нижней части которого располагается топливо. Пеналы помещаются в ячейки хранения, окруженные бетонной кладкой по всему объему площадки. Это существенно повышает уровень надежности и безопасности при хранении ОЯТ. Таким образом, применение двухцелевых контейнеров больше не являлось необходимым, и была сформирована потребность в разработке нового типа конструкций.

Для этих целей на ГХК были разработаны специализированные пеналы для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000. Данный пенал является изобретением, сконструированным на базе ГХК [32]. Принципиальные конструкционные особенности отражены на рисунке 3. После размещения топлива в данном пенале, он помещается в бетонные конструкции на хранение.



1 – корпус контейнера; 2 – плоское днище; 3 – амортизатор; 4 – крышка; 5 – решетка; 6 – диски;
7 – скрепление дисков; 8 – ячейки для размещения ампул

Рисунок 3 – Контейнер RU 2435239 сухого хранения ОЯТ на ГХК

Рассматриваемый пенал является герметичной конструкцией, герметизация достигается благодаря сварному соединению между корпусом и крышкой пенала. Крышка пенала также имеет центральный грибок, который служит в качестве грузозахватного устройства совместно с дублирующим буртом, расположенным по периферии крышки. Грибок оснащен специализированным клапаном, позволяющим заполнять и откачивать воздух среды хранения (гелий). Внутри пенала располагается решетка с ячейками для размещения ОТВС, представляющая собой набор дисков с соосными отверстиями. ОТВС закрепляются на вертикальных стойках с учетом расстояний, которые предполагают размещение с заданной непрямолинейностью. В центральной отверстии решётки также размещается ампула с пучков ТВЭЛ. Основные характеристики пенала приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики корпуса пенала

| Параметр | Значение |
|------------------------|-----------------|
| Тип материала | Сталь 12Х18Н10Т |
| Диаметр, мм | 635 |
| Длина, мм | 1000 |
| Толщина, мм | 4 |
| Тип сварных соединений | Стыковые |

Для обеспечения целостности пенала осуществляется сварка частей конструкции автоматическим аргонно-дуговым методом с неплавящимся электродом (вольфрамовый электрод ЭВЛ Ø3). При этом в качестве сварочного источника выбран Miller MaxStar

350700-200DX (200A), при наличии постоянного тока и электрода с размерами от 1 до 4 мм (220/1 В, 380/3 В). В результате исследуемый объект имеет 5 стыковых сварных соединений категории II и IV [32].

Именно эти сварные швы будут представлять наибольший интерес при контроле в рамках обеспечения качества конструкции в целом, в силу наибольшей вероятности возникновения дефектов в данной области. Корпус пенала имеет три продольных стыковых и два поперечных стыковых соединения. Они представлены на рисунке 4, два продольных шва располагаются симметрично вдоль корпуса (на рисунке представлен один из них), третий продольный шов соединяет между собой элементы крышки пенала. Наиболее критичным является обеспечение качества герметизирующего шва между крышкой и корпусом, так как при транспортировке пенала непосредственно к нему будет прилагаться нагрузка.



Рисунок 4 – Корпус пенала для сухого хранения ОЯТ

Российское решение существенно отличается от зарубежных, так как оно представляет собой металлический пенал, имеющий в качестве назначения только размещение ОЯТ с целью долговременного хранения. Это подчеркивает актуальность разработки системы контроля герметичности на основе оценки качества сварных соединений, имеющихся у пенала для хранения ОЯТ производства ГХК для исключения возможности распространения делящегося материала за пределы оболочки пенала. Далее обратимся к опыту оценки качества сварных соединений для анализа мировых тенденций в данном направлении.

1.3 Методы оценки качества сварных соединений пеналов сухого хранения ОЯТ

Основываясь на опыте сухого хранения ОЯТ приведенного в разделе 1.2, можно говорить о том, что индустрия производства пеналов постоянно совершенствуется, что требует улучшения и разработки новых методик и способов по контролю их качества.

Наиболее распространённым методом контроля сварных соединений считается радиографический, в силу его наибольшей изученности и опыта в применении. Однако совершенствование альтернативных методов ведет к изменению данной ситуации.

Так, например, департаментом энергетики США обозначена необходимость в развитии и исследовании методов УЗК с целью избавления от негативного влияния излучения при РК [33]. Описываемая в документе техническая база основывается на применении этих двух методов контроля: радиографического и ультразвукового. Более того, согласно одному из действующих документов в области контроля качества объектов АЭ США, УЗК также является вторым по предпочтению методом контроля сварных швов аустенитных сталей [34].

Согласно российским нормативным документам РК является одним из обязательных этапов неразрушающего контроля качества свариваемого оборудования атомной энергетики [35]. Он используется для оценки состояния пеналов хранения ОЯТ на данный момент. Рассмотрим более подробно применение методов РК.

С целью проверки качества сварных соединений обычно используют излучений фотонов или нейтронов. Нейтронное оборудование является более сложным и метод нейтронной радиографии более трудоемок, поэтому чаще применяют рентгеновское излучение. При этом, в качестве источников, могут быть использованы рентгеновские трубки, обладающие наибольшей чувствительностью контроля, или радиоактивные изотопы для получения гамма-излучения, что наиболее опасно для персонала, но при этом могут быть просвечены объекты большей толщины, хотя чувствительность будет ниже. Еще одним источником излучения являются электронные ускорители (линейные или циклические).

Наиболее серьёзным недостатком применения методов рентгеновского контроля является необходимость в обеспечении системы биологической защитой персонала, осуществляющего диагностику. Вред может быть нанесен не только организму персонала, но и также может произойти загрязнение его одежды или оборудования. Кроме того, современные высококачественные системы весьма дорогостоящие. Для получения максимальной чувствительности необходимо использовать низкоэнергетическое рентгеновское излучение или высокоэнергетическое тормозное излучение ускорителей.

Для регистрации результатов при РК сварных соединений применяют специальные технические пленки, тип которых определяется материалом контроля. При этом тщательно

подбирается экспозиция при проведении контроля, возникает необходимость в проведении затратных с точки зрения времени и стоимости операций по обработке пленок. Рентгеновские пленки необходимо проявлять, закреплять, промывать и т.д. Происходит дополнительный расход и утилизация химикатов. Но даже в случае альтернативного использования детекторов рентгеновского излучения, экспозиция в любом случае, как и оценка, будет требовать значительного количества времени.

Для проведения контроля цилиндрических объектов, таких как пеналы для хранения ОЯТ, существенным недостатком будет являться искажение результатов в связи с геометрической формой объекта. При просвечивании пенала данные, получаемые с разных стенок, будут перекрывать друг друга. Поэтому, чтобы провести эффективный контроль требуется проведение дополнительных измерений, наличие как минимум трех экспозиций.

Помимо этого, рентгенографические методы контроля обладают рядом физических ограничений. Нечувствительность к трещинам, непроварам и другим плоскостным дефектам с раскрытием, не совпадающим с направлением просвечивания, невозможность обнаружения дефектов с размерами в направлении просвечивания менее удвоенной чувствительности, а также любых несплошностей, изображение которых может совпадать с изменениями геометрических параметров объекта. Также стоит учитывать, что в случае необходимости проведения контроля после постановки ОЯТ на хранение, проведение РК станет невозможным, в связи с высоким радиационным фоном топлива, который может перекрывать полезные сигналы от источника излучения.

В то же время, как уже обозначалось ранее, современный уровень развития метода УЗК делает его все более привлекательным для использования как альтернативного метода, близкого по точности и при этом позволяющего избежать указанных ранее недостатков радиографии.

В зарубежной практике уже существуют примеры использования УЗК для контроля пеналов для сухого хранения ОЯТ. Так он применялся для стальных элементов пеналов VSC-24 (США), изготавливаемых из бетона, а также для контроля медных пеналов POSIVA (Финляндия) [36].

Существует также опыт совмещения методов ультразвукового и РК. Комплексная система неразрушающего контроля медных контейнеров была разработана в лаборатории в Швеции (Рисунок 5) [37]. Система УЗК используется для контроля компонентов пенала, таких как медная труба, крышка и дно пенала, а также чугунная вставка (Рисунки 6, 7).



Рисунок 5 – Системы радиографии (слева) и УЗК (справа) сварных швов



Рисунок 6 – Система УЗК медных труб и чугунных вставок

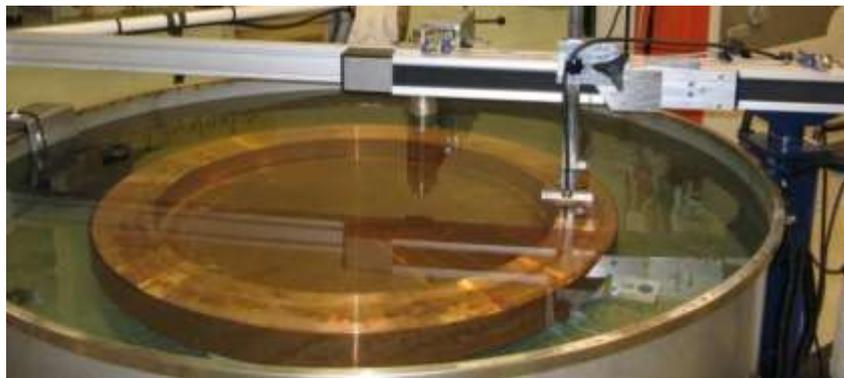


Рисунок 7 – Система УЗК медной крышки и дна

Система РК, разработанная компанией POSIVA, используется для контроля сварных швов контейнеров с ОЯТ [38]. Схема РК представлена на рисунке 8. Данные контроля получают с цифрового детектора. В качестве источника излучения используется 9 МэВ линейный ускоритель. Во время контроля пенал вращается, в результате чего происходит сбор данных по всему сварному шву.

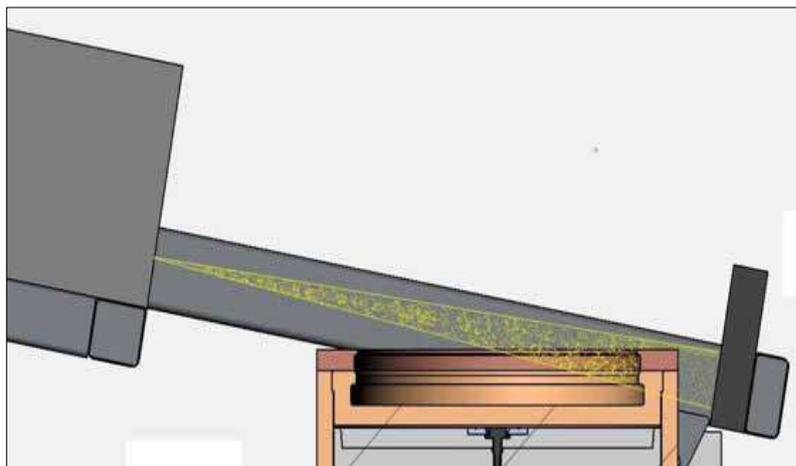


Рисунок 8 – Принципиальная схема РК

При контроле сварных швов размеры дефектов оцениваются из данных радиографической картины. По данным контроля можно измерить геометрические размеры дефекта (Рисунок 9). Далее необходимо определить из какой части контейнера поступает сигнал. Глубина дефекта определяется по контрастности серого цвета.

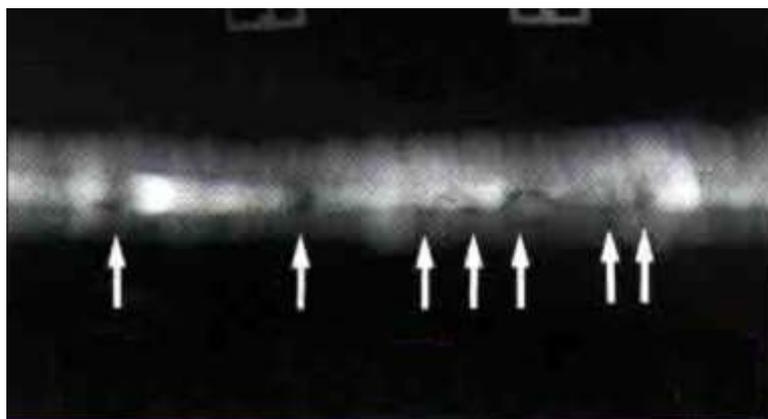


Рисунок 9 – Определение размеров дефекта в РК

Развивается применение систем цифровой рентгенографии, которые по сравнению с традиционными методами позволяют существенно повысить производительность. Но на данный момент в нашей стране не существует нормативных документов, предполагающих применение данного вида технологий. Кроме того, использование цифровых детекторов не решает основной проблемы, связанной с потенциальной опасностью дополнительного облучения персонала и неспособностью обнаружения определенного типа дефектов, так как физическая основа метода остается прежней.

Обнаружение дефектов в чугунной вставке в рассматриваемом случае происходит при помощи методов УЗК. Она изготавливается с учетом механической нагрузки при постановке в

хранилище, и имеет разные требования контроля для различных областей объема [39]. Вставка разделена на 3 зоны контроля, как показано на рисунке 10. Сиреневым цветом отмечена поверхностная зона, зеленым – толщина внутренней части и желтым – область между каналами.

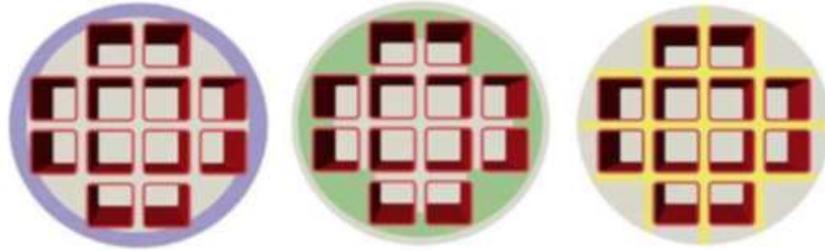


Рисунок 10 – Зоны контроля чугунной вставки

Для этих областей посредством УЗК проводится следующее:

- контроль под углом поверхностной зоны (сиреневой) с помощью контактных датчиков в соответствии с рисунком 11, с целью выявления дефектов;
- контроль области между поверхностью и каналами (зеленой) с помощью преобразователей с линейных ФАР, как представлено на рисунке 11, для обнаружения объемных дефектов;
- контроль межканальной области (желтой), используя линейные ФАР, для обнаружения объемных дефектов (Рисунок 12).

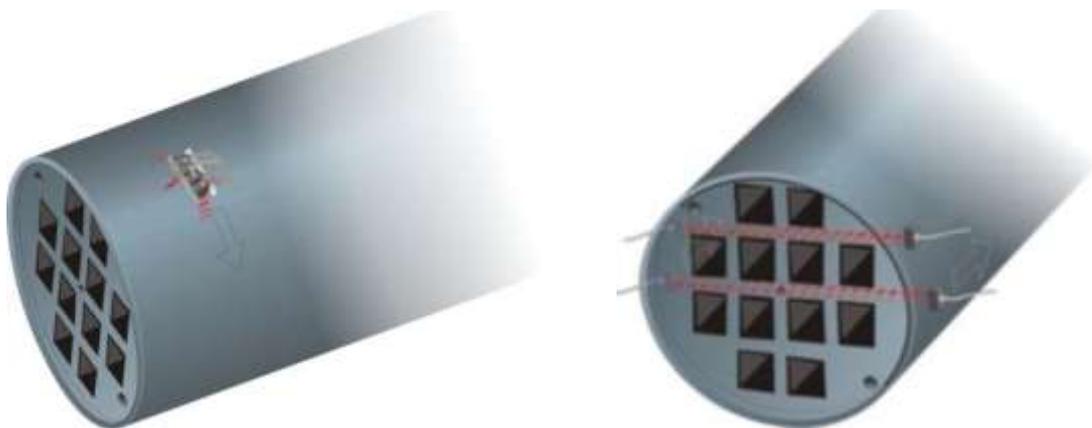


Рисунок 11 – УЗК поверхностной (слева) и межканальной (справа) зон чугунной вставки



Рисунок 12 – Сканирование вставки с применением ФАР

Размещение датчиков при УЗК является серьезной проблемой при контроле пеналов хранения ОЯТ. Затрудненный доступ и повышенный радиационный фон не позволяют производить ручной контроль при эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС, так же, как и пеналов для хранения ОЯТ. В таком случае необходимо осуществление автоматизации процесса контроля. Сканирование предлагается проводить с помощью использования стального прута, на одном из концов которого закреплен ультразвуковой преобразователь или роботизированного гусеничного шасси.

Угловое сканирование поверхностной области вставки осуществляется в четырех направлениях с помощью метода TRL (Transmit-Receive Longitudinal), который используется при контроле корпусов реакторов [40]. При сканировании двух других областей используются традиционные методы контроля с применением датчиков с ультразвуковыми ФАР.

Сканирование медной трубы осуществляется при помощи использования прямого прозвучивания, как показано на рисунке 13. Контроль проводится иммерсионным способом с использованием датчиков с линейными ФАР, которые позволяют оптимизировать звуковое поле и достичь максимальной скорости сканирования.



Рисунок 13 – УЗК медной трубы

УЗК крышки контейнера осуществляется таким же способом, как при контроле медной обечайки, то есть при помощи датчиков с ФАР. Предварительно крышка разделяется на две зоны

контроля, как показано на рисунке 14. Так как толщины зон различные, при сканировании используется разная глубина фокусировки.

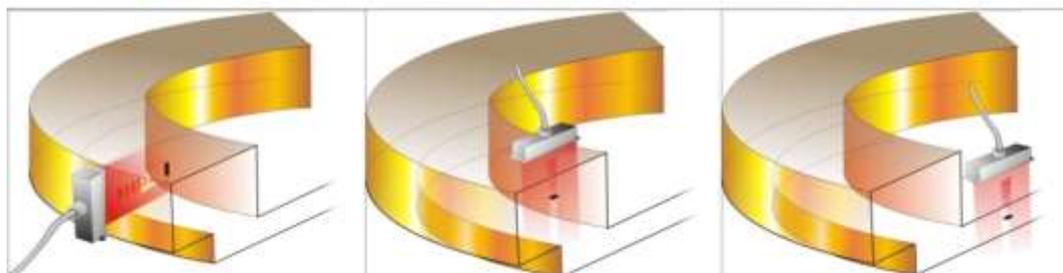


Рисунок 14 – УЗК крышки контейнера

Оценка качества герметизирующего сварного шва осуществляется с помощью УЗК и радиографии (Рисунок 15) [41]. При УЗК используется линейная ФАР, размещенный на поверхности крышки контейнера.

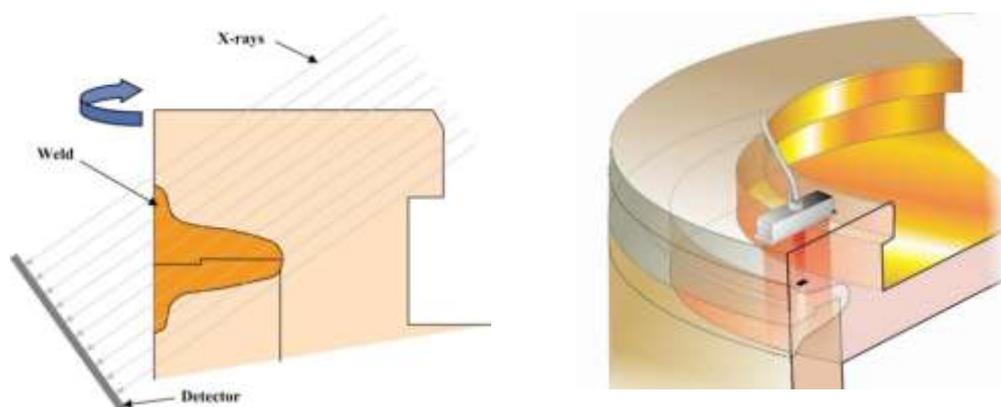


Рисунок 15 – Радиография (слева) и УЗК (справа) герметизирующего сварного шва

В рассматриваемом случае применялась электронно-лучевая сварка, наиболее характерными дефектами которой являются поры, полости и холодные спаи [42]. Размер пор, как правило, меньше 3 мм. Основными причинами их появления являются плохая очистка и окисление поверхности. Полости в медных сварных швах обычно появляются в связи с несоблюдением технологических режимов и их размеры варьируются от 0,5 до 20 мм. Такие дефекты как поры и полости, могут быть обнаружены в результате УЗК. УЗК позволяет определять дефекты с размерами 1 мм и более. Однако в некоторых случаях чувствительность обнаружения может уменьшиться.

Холодные спаи, как правило, возникают на краях или в глубине сварных швов, что значительно усложняет процедуру их обнаружения с помощью ультразвуковых методов. В некоторых случаях дефекты такого рода можно обнаружить только разрушающими методами.

Однако спаи, имеющие четкие вертикальные полости размером не менее 1 мм, могут быть определены при помощи УЗК с возможностью трехмерной реконструкции изображения объекта.

Нужно отметить, что в случае контроля качества пеналов для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК, производства ГХК, размещение датчиков также должно осуществляться под углом на поверхности пенала вдоль сварного шва. При этом возможно осуществлять мониторинг качества сварных соединений после размещения ОЯТ, так как конструкция пенала обеспечивает биологическую защиту для персонала. Кроме того, в рамках диссертационной работы осуществлены разработка и создание специализированного механизированного сканирующего устройства, позволяющего производить автоматизированный контроль объекта, в отличие от используемого для контроля пеналов POSIVA ручного сканирования.

Помимо особенностей размещения ультразвуковых преобразователей в рассматриваемом случае, еще одним важным моментом является применение методов последующей визуализации полученных УЗ данных. Определение размера дефекта в УЗК показано на рисунке 16.

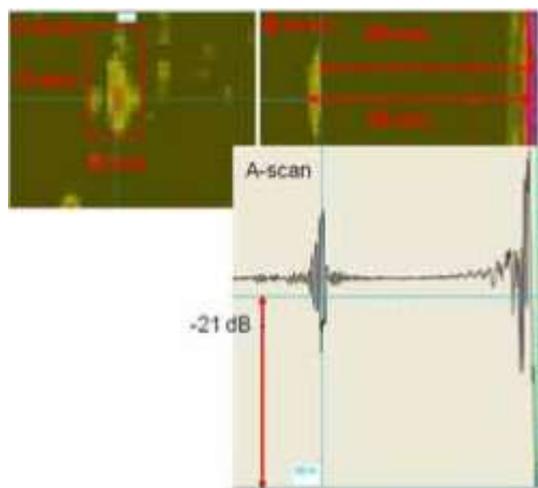


Рисунок 16 – Оценка размеров дефекта при сканировании (угол 0°)

Такой подход значительно отличается от традиционных методов УЗК. В данном случае необходимо провести сканирование во всех трех направлениях. Таким образом достигается возможность получения разверток по различным плоскостям (В, С-развертки). Геометрические размеры дефекта определяются анализом развертки типа С. Оценка глубины производится из данных В-развертки. Значение амплитуды и положение дефекта анализируется из данных А-развертки. Результаты контроля при углах $\pm 20^\circ$ должны рассматриваться одновременно с результатами при 0° для получения полной информации о дефекте.

Вместе с тем, наиболее современные методы обработки данных позволяют проводить трёхмерную реконструкцию контролируемого объема, благодаря переводу получаемого массива

данных в трёхмерную модель. На сегодняшний день происходит развитие применения таких систем. Таки образом становится возможным достижение более точной оценки качества контролируемых объектов.

Успешный опыт зарубежных производителей пеналов в обнаружении дефектов и оценке качества наглядно демонстрирует потенциальную выгоду от применения различных методов диагностики. Используя рассмотренный опыт, а также развивая использующиеся в настоящее время методики, возможно модернизировать и задать тенденции формирования более совершенных и оптимальных технологий, не препятствующих производственному процессу. Исследования в области неразрушающего контроля способствуют подобному развитию и определяют становление технологий неразрушающего контроля, в частности методов ультразвуковой диагностики.

Рассмотрим более подробно особенности УЗК и возможности применения, позволяющие проводить томографический анализ ОК с целью достижения наибольшей эффективности оценки качества сварных соединений.

1.4 Общие аспекты применения УЗК сварных соединений

УЗК сварных швов в общем понимании является методом неразрушающего контроля целостности сварных соединений и поиска скрытых и внутренних механических дефектов недопустимой величины и других отклонений от заданной нормы [43]. Методом ультразвуковой дефектоскопии проводится оценка качества различных типов сварных соединений. УЗК является эффективным методом при выявлении различных типов дефектов, таких как поры или включения, трещин и другие.

Способы УЗК традиционно различают по методам передачи возбуждения, вызванного в пьезоэлементе акустического преобразователя, в контролируемый объект. Выделяют следующие способы:

- а) контактный (наличие контакта между преобразователем и поверхностью с использованием смазочного материала);
- б) целевой (контакт обеспечивается с помощью струи воды, удерживающейся силами поверхностного натяжения);
- в) иммерсионный/частично иммерсионный (имеется толстый слой жидкости, объект целиком или частично погружается в иммерсионную ванну);
- г) струйный (струя под давлением, через которую создается акустический контакт);
- д) бесконтактный (электромагнитно-акустический, преобразование электромагнитных колебаний в механические) [44].

Последний способ является наиболее перспективным, но вместе с тем и наиболее технически сложно реализуемым. Одним из основных недостатков электромагнитно-акустических преобразователей является низкая помехозащищенность. На мировом уровне эта технология находится на стадии разработки за счет оптимизации систем подмагничивания и усиления для повышения уровня полезных сигналов по сравнению с уровнем шума.

Широкое распространение получил традиционный контактный метод. Он позволяет получать информацию о глубине залегания дефекта с хорошим отношением сигнал/шум. Метод поддается автоматизации и примерно соответствует ручному контролю с точки зрения способности обнаружения и чувствительности. Однако метод имеет ряд ограничений из-за соприкосновения с тестируемым образцом – износ датчиков, высокие требования к качеству акустического контакта. Автоматизация чаще всего заключается в использовании системы линейных манипуляторов, что позволяет произвести контроль лишь ограниченных участков.

Применяется способ ввода ультразвуковой волны через струю воды, поданную под давлением. По сравнению с другими методами отношение сигнал/шум уменьшается из-за турбулентности и водяных брызг. Определение глубины залегания дефекта при использовании подобного метода является сложно выполнимой задачей в связи с тем, что в зависимости от изменения геометрического профиля объекта становится сложнее достоверно оценить расстояние от преобразователя до обнаруженной несплошности. Несмотря на данные недостатки, этот метод позволяет реализовать автоматизацию контроля и увеличить скорость проведения инспекции из-за отсутствия контакта.

Иммерсионный метод ввода ультразвуковой волны требует полного или частичного погружения в воду контролируемого объекта. Вместе с этим обеспечивается отсутствие факторов, снижающих чувствительность контроля, хорошее отношение сигнал/шум, представляется возможным оценить глубину залегания дефекта, отсутствует износ датчика. До недавнего времени, данный метод не был распространен для контроля ввиду порчи объектов контроля (разбухание, коррозия) от длительного контакта с водой во время контроля. Сегодня возможности в сфере автоматизации контроля позволяют проводить контроль со скоростью достаточной для того, чтобы степень влияния воды на объект была сравнима с контролем через струю воды под давлением. Таким образом, используя последние достижения в области робототехники, представляется возможным сочетать достоинства контактного метода и контроля через водную среду без нанесения вреда контролируемому объекту на базе иммерсионных технологий. Для этого использование роботизированных манипуляторов является приемлемым решением. Эти устройства оптимально подходят для контроля сложных и криволинейных поверхностей. Они обеспечивают максимальную точность за счет возможности тонкой

настройки траектории контроля. В то же время они показали высокую экономическую эффективность и отличные свойства по воспроизводимости контроля.

Еще одним важным аспектом при разработке эффективной методики оценки качества объекта является последующая обработка акустического сигнала, получаемого при инспекции. Применение многоэлементных преобразователей дало развитие технологиям томографического контроля качества, в том числе и для диагностики металлических объектов со сварными соединениями. С учетом возможности управления порядком возбуждения ультразвуковых волн и определения схем сканирования стало возможным производить дальнейшую реконструкцию изображений объектов контроля. Для этого необходимо разрабатывать специальные алгоритмы обработки акустической информации, которые позволят определять координаты расположения дефектов и их размеры, что обеспечит более объективную оценку состояния изделия и возможность ее дальнейшего использования.

Далее рассмотрим наиболее широко применяемые на данный момент способы обработки акустических данных.

1.5 Способы визуализации результатов УЗК

Традиционно для решения задач визуализации акустических сигналов требуется получить массив данных, чаще всего посредством многоканальных акустических систем на основе ФАР. Многоэлементный преобразователь или ФАР представляет собой ультразвуковой датчик, чья активная излучающая площадь разделена на сегменты, расположенные по определенному закону. Так, наиболее распространены линейные решётки, элементы которых располагаются вдоль оси решетки либо матричные преобразователи, где учитываются два перпендикулярных направления. Элементы возбуждаются независимо друг от друга, имеется возможность регулировать задержки при излучении и приеме сигналов. Важным свойством многоэлементного преобразователя является возможность управления акустическим полем. Внедрение программируемых задержек по времени в каждый ультразвуковой канал системы позволяет создавать изменение в направлении излучения, тогда как акустическое поле возникает из суперпозиции элементарных ненаправленных волн (Рисунок 17). Задержки во времени должны выбираться таким образом, чтобы максимум компонент поля всех элементов массива создавал волновой фронт, перпендикулярный направлению распространения. Другая возможность состоит в фокусировке акустической энергии в определённую точку объёма (в пределах ближнего поля излучателя).

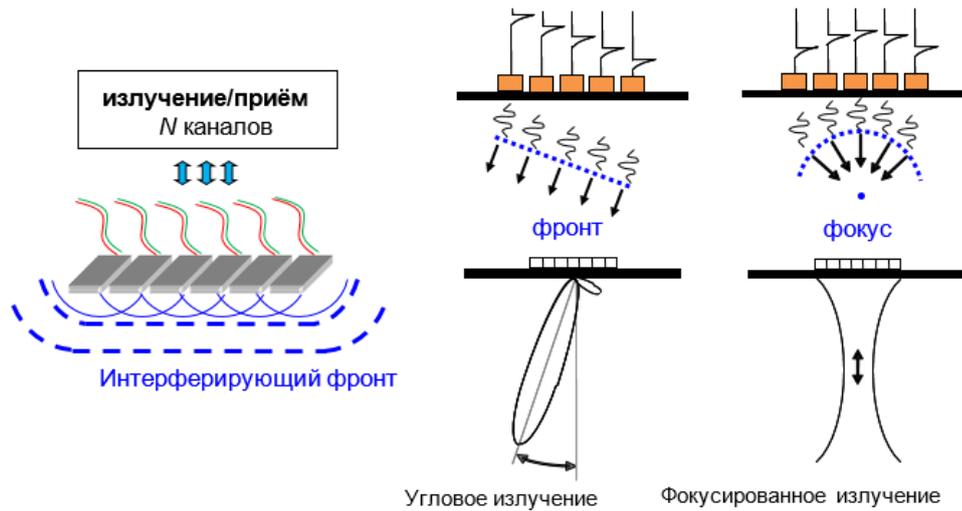


Рисунок 17 – Режимы работы многоэлементного преобразователя

Такая техника имеет особые преимущества при ультразвуковом контроле объектов с криволинейной геометрией (а также сварных соединений), поскольку датчики могут быть установлены под различными углами с помощью призм (Рисунок 18, слева). Обычно результаты таких исследований представляются в виде сектор-скана, представляющего собой сечение объекта в плоскости (Рисунок 18, справа). На рисунке 18 цветом изображена амплитуда одиночных А-сканов при изменении угла так, чтобы информация о нескольких углах излучения могла храниться в двумерном изображении.

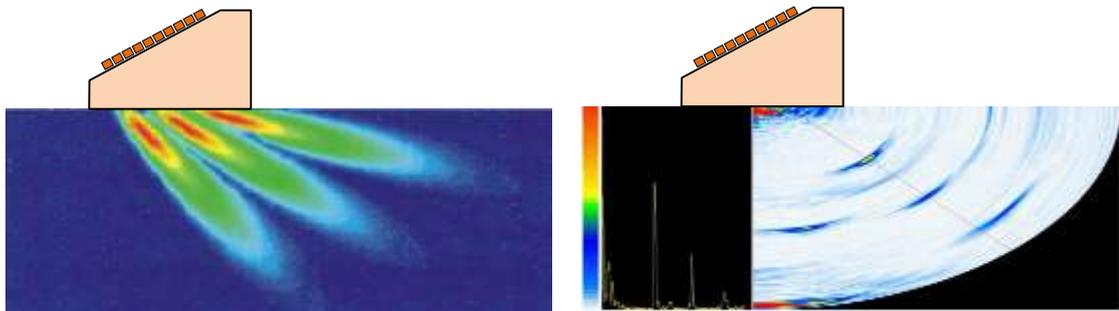


Рисунок 18 – Использование призмы (слева) для получения сектор-сканов (справа)

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

Исследования в области развития ультразвуковых методов дефектометрии осуществляются в различных странах. Как уже было отмечено, в России основными являются научные коллективы под руководством Водилкина А.Х., Бадаляна В.Г., также как коллектив

«Научно-производственного центра неразрушающего контроля ЭХО+» совместно с академ. Алешиным Н.П. и коллектив Самокрутова А.А. и Шевалдыкина В.Г. на базе Научно-производственной фирмы «АКС» [7-14].

В зарубежных профильных журналах последние годы отслеживаются многие методы УЗК, имеющие в результате изображения, которые реализуют схожие идеи в обработке ультразвуковых сигналов и реконструкции ультразвуковых изображений. Они основаны на применении расфокусированных акустических полей для УЗК материала, в том числе с целью регистрации ультразвуковых эхо-сигналов с учётом информации о фазе для восстановления объёмного изображения [45-50]. В основе этих методов лежит расширенный принцип алгоритма синтезированной фокусировки сигнала или SAFT обоснованный эвристически, а в 1986 году подкреплённый в работе Mayer K. И К.-J. Langenberg [51].

Классические исследования алгоритмом SAFT проводятся с использованием ультразвуковых датчиков, имеющих малую апертуру и поэтому создающих акустическое поле с высокой дивергенцией. Датчик располагается на одномерной или двумерной дифракционной решётке в согласовании с линейной или поверхностной апертурой. Рисунок 19 демонстрирует результат обработки данных с применением SAFT-алгоритма.

Примем, что объект исследования имеет три точечных отражателя с координатами (x_1, z_1) , (x_2, z_2) и (x_3, z_3) . Материал объекта гомогенно-изотропный. На объекте располагается призма с маленьким значением апертуры. Призма отправляет в момент времени $t_0 = 0$ ненаправленную акустическую волну, распространяющуюся в объекте с постоянной скоростью V .

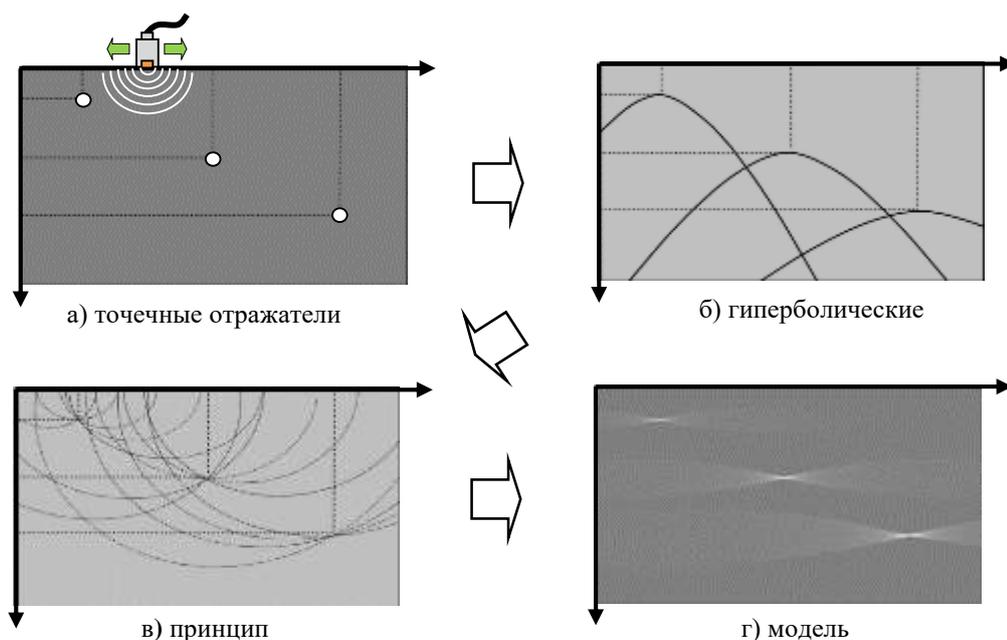


Рисунок 19 – Реконструкция изображений с применением синтезированной фокусировки сигнала

После того, как волна достигает дефекта (Рисунок 19, а), он создаёт (как вторичный источник) сферические поля рассеивания, которые регистрирует многоэлементный датчик. Датчик перемещается на расстояние dx по сетке (с шагом примерно 0,1 длины волны). Процедура отправки-получения сигнала далее повторяется для каждой позиции. Разнице в области получения сигнала соответствуют гиперболические графики времени от координаты (Рисунок 19, б).

Следующий шаг реконструкции заключается в установлении дискретной (попиксельной) пространственной модели объекта исследования и проекции полученных гипербол на модель с учётом позиций измерения (Рисунок 19, в). Переход от временных диапазонов (полученные кривые времени от координаты) к пространственной модели возможен благодаря множителю (а именно, скорости звука). Сформулировать это математически можно следующим образом: каждому пикселю (x', z') в пространстве сопоставлено значение R , соответствующее значению интеграла скалярных результатов измерений η вдоль гипербол B (1):

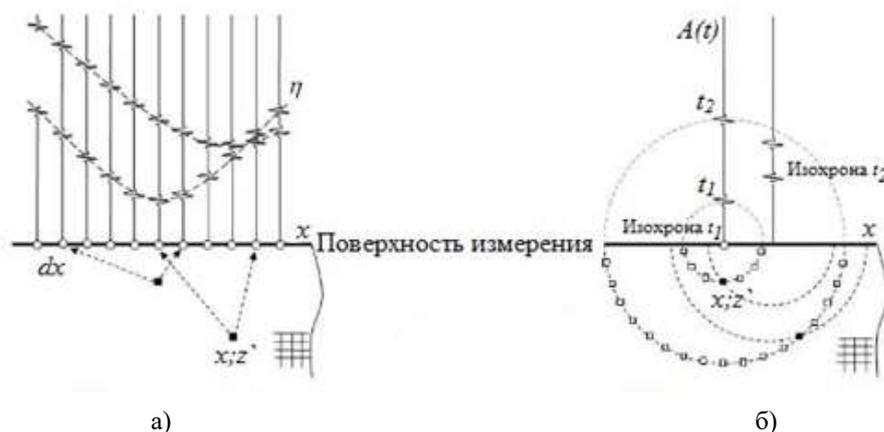
$$R(x', z') = \int_B \eta \left(x, t = 2 \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (z-z')^2}}{V} \right) dx, \quad (1)$$

где x – порядок позиций измерения.

Это уравнение называют пиксель-ориентированной формулировкой SAFT-алгоритма. (Рисунок 20, а). Если дефект находится в точке (x', z') , интегрирование даст в результате высокое значение из-за интерференции измеряемых данных (Рисунок 19, в, г). Иначе – интегрирование даёт меньшее значение. После расчёта для каждого пикселя можно выделить в пространственной модели «узлы» (точки, где измеряемые сигналы усиливают друг друга при наложении), которые соответствуют дефектам в объекте измерения (Рисунок 19, г).

Альтернативный метод реконструкции алгоритмом SAFT состоит в проекции полученных сигналов времени пробега в пространственную модель объекта измерения. Такая формулировка процесса реконструкции впоследствии упрощает интерпретацию принципа инверсного согласования фаз при исследовании методом тактированной ФАР анизотропных материалов.

Поскольку используемый для алгоритма SAFT датчик обладает маленькой активной апертурой, он облучает всё полупространство целиком и получает отражённые/преломлённые волны со всех направлений одновременно. Информация о положении отражателя в отдельно взятом А-скане доступна только в форме времени пробега волны. Если в А-скане $A(t)$ есть свидетельства наличия дефекта к времени $t = t_l$ (рисунок 20, б).



а) пиксель-ориентированная формулировка; б) А-скан- ориентированная формулировка
Рисунок 20 – Объемные модели SAFT-реконструкции изображений объектов контроля

Проекция А-скана на пространственную модель заключается в сопоставлении значений $A_l = A(t_l)$ каждому пикселю, через которые проходит эта линия. На рисунке скорость распространения волны для наглядности приравнена к $V = 2$. В этом случае полученные А-сканы с различных позиций измерений проецируются на модель и там складываются. Через интерференцию выражаются вторичные звуковые потоки (отражённые от дефектов). Чем больше ультразвуковой информации проходит через образец, тем выше соотношение сигнал/шум при реконструкции с применением алгоритма SAFT.

Призма многоэлементного датчика содержит N элементов, расположенных друг от друга на определённом расстоянии. Элементы, имеющие почти одинаковые физические свойства, могут, по аналогии с обычным SAFT-алгоритмом, быть рассмотрены как N позиций измерения одиночного датчика. Элементы многоэлементного датчика малы по сравнению с длиной волны и создают акустическое поле с высокой дивергенцией. Это свойство делает их особенно удобными для проведения измерений с использованием SAFT-алгоритма. Как расширение обычного метода SAFT, которым обрабатывают сигналы одиночных датчиков, можно принять во внимание многочисленные комбинации отправляемых/получаемых волн с использованием многоэлементного датчика при реконструкции изображения объекта. Этот факт расширяет возможности получения информации, а значит, увеличивает разрешающую способность. В этом случае формула (1) принимает вид (2):

$$R(x', z') = \int_B \eta \left(x, t = \frac{\sqrt{(x_S - x')^2 + (z_S - z')^2}}{V} + \frac{\sqrt{(x_E - x')^2 + (z_E - z')^2}}{V} \right) dx, \quad (2)$$

где (x_S, z_S) и (x_E, z_E) – координаты излучателей/приёмников.

Полученные и сохранённые значения времени прохождения сигнала для каждого элемента массива служат входными данными для томографической реконструкции изображения.

При этом важно понимать, что технологии SAFT являются лишь базовой методикой получения изображений за счет математической обработки данных, параметры которой улучшаются за счет различных методик томографического контроля. В связи с этим, в рамках работы предлагается разработка методики, позволяющей проведение оценки качества пеналов для хранения ОЯТ за счет томографического анализа, основанного на применении методов реконструкции.

1.6 Основные принципы ультразвукового томографического контроля пенала для хранения ОЯТ

При ультразвуковом контроле пеналов для хранения ОЯТ преобразователя располагается в околошовной зоне и перемещается относительно всего сварного соединения [52]. При этом может быть достигнуто несколько вариантов контроля. Контроль может выполняться при использовании половины пути акустической волны, как показано на рисунке 21. При данных параметрах контроля осуществляется детектирование трещин на внутренней поверхности пеналов. В случае использования полного пути акустической волны будет наблюдаться большее влияние эффекта затухания.

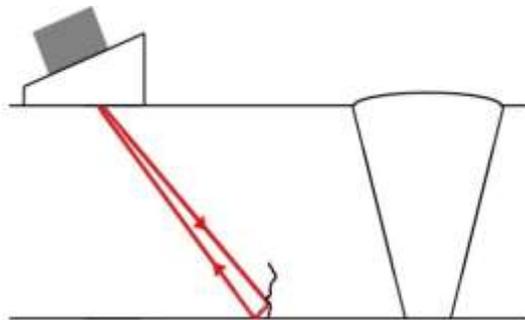


Рисунок 21– Контроль трещин на внутренней поверхности стальных контейнеров ОЯТ

Оценка глубины залегания дефектов может быть определена на основе изменения амплитуды относительно времени прохождения волны (Рисунок 22). Сложнее определить глубину трещин, образовавшихся в результате коррозии под действием напряжений, так как становится труднее распознать отраженный сигнал от такой индикации (Рисунок 23).

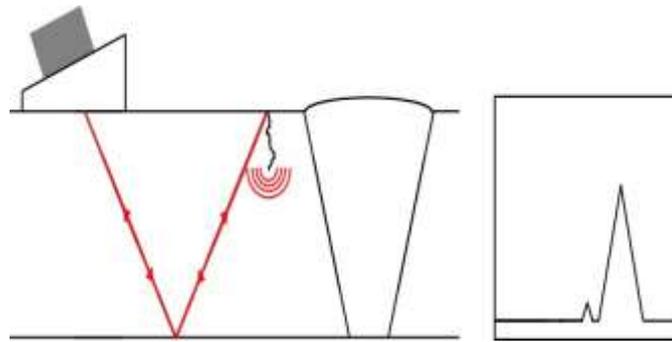


Рисунок 22 – Определение глубины дефекта

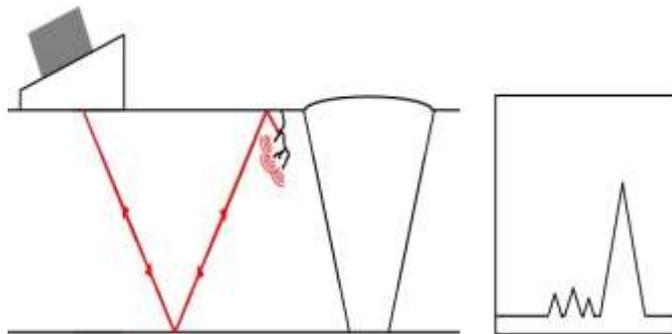


Рисунок 23 – Проблема контроля трещин, вызванных коррозией

Также, важным аспектом при контроле качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ является возможность осуществления механизированного контроля при помощи систем сканирования. Такой способ позволяет справиться с несколькими проблемами, в частности становится возможным проведение оценки качества больших по площади объектов с высокой производительностью, также появляется возможность проведения инспекций дистанционно, в том числе в неблагоприятных для персонала условиях. УЗК осуществляется при помощи преобразователя, закрепленного на специализированном сканере, повторяющем форму объекта, в данном случае пенала для хранения ОЯТ. Реализация методов механизированного контроля уже широко распространена для диагностики трубопроводов в нефтегазовой промышленности, где применение таких систем показывает высокий уровень выявляемости дефектов [53-54].

В рамках данной диссертационной работы рассматривается создание специализированного автоматизированного устройства для контроля качества пеналов для хранения ОЯТ, подробнее это рассмотрено в главе 4.

Для достижения максимальной точности измерений, при учете последующей реконструкции изображений, необходимым является применение ФАР. При этом существуют несколько способов сканирования объекта с использованием многоканальных преобразователей,

отличающихся по принципу набора данных за счет вариаций в параметрах позиционирования преобразователя и режимах излучения:

а) механическое сканирование, которое заключается в перемещении по поверхности объекта ультразвукового преобразователя с широкой ДН и предоставляет данные о координатах текущего положения преобразователя и соответствующей амплитуде, значения которой в дальнейшем суммируется;

б) электронное сканирование, осуществляющееся путем определения оператором законов излучения и приема для формирования фокусированного ультразвукового луча и в качестве выходных данных реконструированное изображение объема ОК;

в) виртуальное сканирование, реализующее динамическую фокусировку, заключающуюся в обработке полученных сигналов при инспекции с целью получения фокусировки на различных глубинах контроля [55-56].

Двумя главными отличиями ультразвуковой диагностики с применением ФАР, основанной на импульсном эхо-методе от традиционной ультразвуковой дефектоскопии, использующей одноэлементные преобразователи, являются возможность набора данных при сканировании по всему объему объекта и способ представления результатов контроля. Если в традиционных системах контроля используется исключительно механическое сканирование внутренней структуры ОК пучком ультразвука, то с использованием решёток возможно применение трех видов сканирования. Также возможно применение различных сочетаний этих способов обзора пространства.

Рассмотрим более подробно существующие методы сканирования.

а) Механическое сканирование

При механическом сканировании излучение и прием ультразвуковых сигналов выполняется периодически при разных положениях преобразователя на поверхности ОК. Вследствие широкой ДН преобразователя сканирование интересующей оператора области в ОК и прием сигналов из нее происходят под разными углами от всех элементов, принятых преобразователем из всех его положений на поверхности объекта. Происходит синтез ультразвуковой апертуры больших волновых размеров и реконструируется изображение внутренней структуры объекта. Причем синтезируемая апертура виртуально (т.е. после обработки сигналов) фокусируется в каждую точку визуализируемой области. Как уже было рассмотрено в пункте 2.2, такой способ обзора пространства и получения его изображения называют методом синтетической фокусируемой апертуры, в англоязычной литературе – «Synthetic Aperture Focusing Technique» – SAFT [51].

б) Электронное сканирование

Электронное сканирование пространства ультразвуковым лучом выполняется с помощью активации группы заданных элементов антенной решётки с квазиодновременным излучением сигналов и последующим одновременным приемом сигналов всей заданной коммутатором группой активных элементов. Для этого в аппаратуре имеется несколько генераторов и столько же приемно-усилительных трактов. Количество генераторов и трактов равно количеству используемых активных элементов антенной решетки. Например, в активную группу может входить 16 элементов антенной решетки, содержащей 64 или 128 элементов.

Электронное сканирование выполняется двумя способами: перемещением группы активных элементов по апертуре антенной решетки или изменением закона распределения взаимных задержек сигналов активных элементов при излучении и приеме.

Электронное сканирование получило наибольшее распространение в промышленной ультразвуковой диагностике с применением ФАР. Большинство зарубежных приборов с антенными решетками работает по этому принципу [57-60].

в) Виртуальное сканирование

Способ виртуального сканирования внутренней структуры ОК, который начал применяться зарубежными разработчиками для промышленной аппаратуры (для медицинских целей он разработан в 1990-х гг. [61]), включает в себя два практически независимых процесса: сканирование объекта с регистрацией ультразвуковых сигналов и преобразование их в цифровой формат и процесс реконструкции изображения из набора принятых сигналов. В зависимости от конкретного аппаратурного решения эти процессы могут быть разнесены во времени, но могут выполняться и одновременно.

Сканирование выполняется поочередно каждым элементом антенной решётки от первого до последнего. Одновременное или квазиодновременное зондирование двумя или несколькими элементами не применяется.

Прием сигналов производится сразу всеми элементами антенной решетки при каждом акте излучения, если аппаратура содержит столько же приемных трактов, сколько элементов в решетке. В случае одноканального приемника он с помощью электронного коммутатора подключается сначала к первому элементу решетки, а излучение производится по очереди с первого элемента до последнего. Затем приемный тракт подключается ко второму элементу решетки, и снова производится измерение, но уже со второго элемента до последнего. Затем приемником включается третий элемент решётки, а излучение производится оставшимися элементами и т.д. до последнего приемоизлучающего элемента.

В обоих случаях, как при многоканальном приемнике, так и при одноканальном полный набор принятых сигналов будет содержать значения сигналов, полученных при каждом

возможном сочетании «приёмник-излучатель». Временной интервал приема выбирается исходя из максимального времени прохождения ультразвуковой волны от излучающего элемента решетки до самой удаленной визуализируемой точки в ОК и обратно к приемному элементу. Каждый принятый в этом интервале сигнал содержит в себе смесь эхо-импульсов от возможных отражателей в ОК, а также возможные помехи от структуры материала и отраженных сигналов от границ ОК.

Важным отличием УЗК на основе ФАР от традиционных методик является представление оператору результатов контроля в виде изображений внутренней структуры материала контролируемого объекта с визуализацией обнаруживаемых несплошностей. Чаще всего используются двумерные изображения плоских сечений ОК, но, как уже было отмечено ранее, ведутся разработки приборов с трехмерным представлением внутреннего строения объекта. Такие изображения, кроме удобства восприятия оператором результатов контроля, достоверно передают информацию о расположении и параметрах несплошностей материала, а также позволяют оценить их размеры. Это привносит значительный вклад в качество результатов и потенциально решает наибольшую проблему УЗК, связанную с интерпретацией результатов.

Наиболее информативные результаты для построения трехмерных изображений контроля формируются при использовании виртуального сканирования. Особенности проведения инспекции в данном случае существенно влияют на процесс реконструкции изображения. Полученные данные фильтруются, далее для всех точек формируемого изображения, из полученных при каждой из конфигураций приемник-излучатель, производится выборка отсчетов, время задержки которых равно времени распространения ультразвуковых импульсов от излучающего элемента антенной решетки до соответствующей визуализируемой точки в ОК и обратно к приемному элементу. Выборка производится для всех сочетаний передающих и приемных элементов решетки, так как задействованы все пары элементов. Такой режим также называется режимом двойного сканирования. Суммирование одинаковых по времени распространения волны амплитудных сигналов из указанных выборок определяет яркость и цвет каждой точки изображения. Соответственно, достигается ситуация, при которой суммарное значение сигнала в каждой заданной точке изображения будет равно значению, которое могло бы быть получено в случае применения сфокусированного преобразователя. Общее количество точек фокусировки равно количеству пикселей изображения и достигает обычно десятков тысяч. Изображение реконструируется «поточечно» и представляет собой прямоугольный растр. Алгоритм реконструкции изображения в сути своей является алгоритмом SAFT, но т.к. в обработке участвуют комбинированный сигнал, получаемый от движущейся решетки, то алгоритм обработки получил аббревиатуру «SAFT-C» [62-63].

Поскольку сканирование пространства в ОК происходит после приема ультразвуковых сигналов в процессе реконструкции, данный способ инспекции является виртуальным (вычислительным). Физического сканирования не происходит. Элементы антенной решетки излучают и принимают рассеянный ультразвук. Этот принцип визуализации по алгоритму SAFT-C был запатентован в России с приоритетом 1994 года [64].

В зарубежной литературе также встречаются и другие названия данного алгоритма реконструкции: «Full Matrix Capture» (FMC) [65] или «Total Focusing Method» (TFM) [66], а также «Digitally Focused Array» (DFA) [67]. Последний был разработан на базе Томского политехнического университета совместно с университетом Фраунгофера и имеет ряд отличий. Рассмотрим его более подробно.

1.7 Технология цифровой фокусировки сигнала DFA

Метод цифровой фокусировки или DFA реализуется таким образом, что только один элемент решетки посылает сигнал, остальные же работают в режиме приёма, как и в случае набора данных при использовании технологии SAFT-C. Принятые временные сигналы сохраняются. Например, в один из тактов измерения излучает i -тый элемент, элементы с 1 по N принимают сигнал и формируется матрица A_{ij} (Рисунок 24). После N тактов матрица заполнена – она содержит временные сигналы каждой комбинации излучатель-приемник [67].

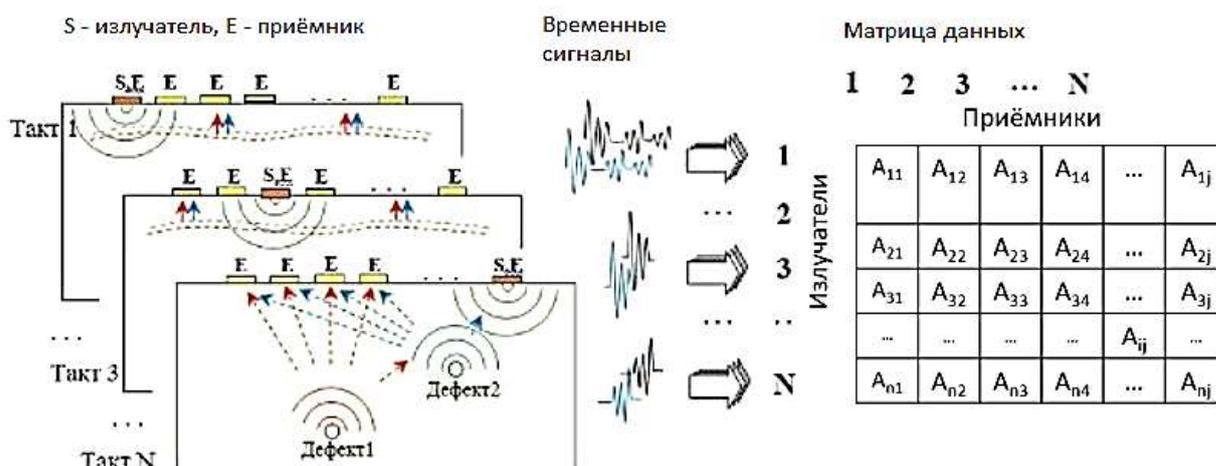


Рисунок 24 – Основы метода DFA

Идея, лежащая в основе концепции решеток с цифровым фокусом, состоит в том, что физическая суперпозиция элементарных ультразвуковых волн, формируемых в материале ФАР, может быть воссоздана искусственно. С помощью импульсного многоэлементного излучателя можно излучать элементарные волны каждым отдельным элементом матрицы. Просуммировав

эти сигналы в соответствие с желаемой фокусировкой, становится очевидным, что на результирующем искусственном А-скане времена пробега звуковой волны от датчика до точки в объёме материала абсолютно эквивалентны временам, полученным с помощью традиционных излучателей.

Принцип DFA-реконструкции объясним на примере линейной ФАР. В случае линейного массива реконструируемая область представляет собой плоскость, перпендикулярную к поверхности объекта исследования. Соответствующий рисунок по аналогии с обычной техникой представляется в виде сектор-скана (Рисунок 25).

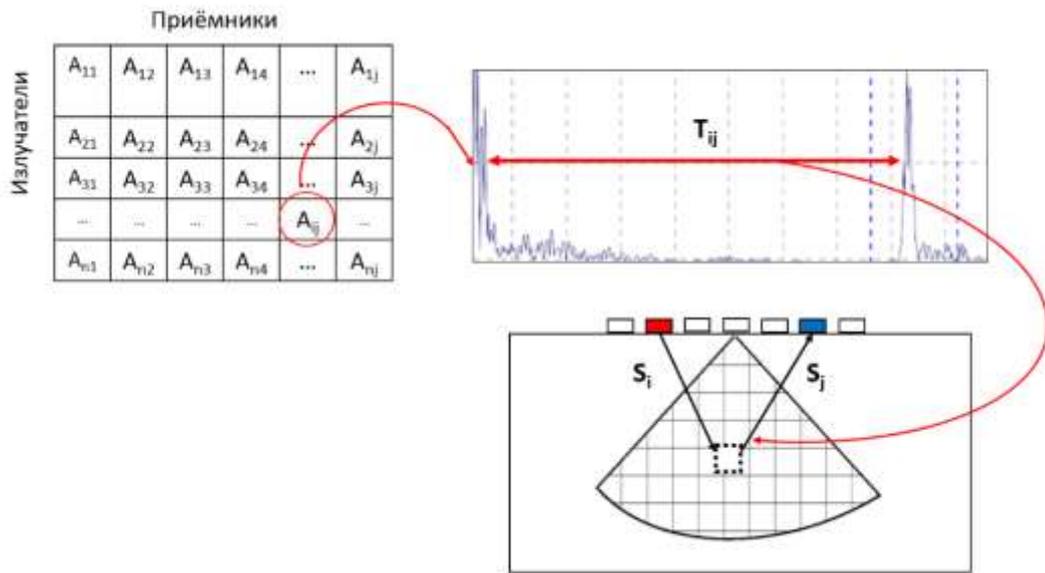


Рисунок 25– Принцип реконструкции сектор-сканов

Обратная проекция измеренных временных сигналов реализуется следующим образом. Секторный график разбивается на отдельные пиксели. Для каждого пикселя реконструируемой области рассчитывается время пробега волны T_{ij} до пикселя (X_m, Z_m) и обратно при актуальной позиции излучателя (X_i, Z_i) и приёмников (X_j, Z_j) с учётом известной скорости распространения волны. Формулы для расчета приведены ниже, при учете, что S_i и S_j соответствуют расстоянию для каждого пикселя от заданного излучателя и до приёмника соответственно:

$$S_i = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (z_i - z)^2}; \quad (3)$$

$$S_j = \sqrt{(x_j - x_m)^2 + (z_j - z)^2}; \quad (4)$$

$$T_{ij} = \frac{S_i + S_j}{v}. \quad (5)$$

Затем значение амплитуды времени пробега сигнала прибавляется к уже сохранённому значению для этого пикселя. Эта процедура повторяется для каждого набора «приёмник-излучатель».

Поскольку датчики многоэлементного излучателя создают дивергентное акустическое поле, отдельные элементы не могут дать информацию об азимутальной позиции отражателя – геометрическая позиция проецируемых сигналов A_{ij} отвечает полусфере при $i = j$ или полуэллипсу при $i \neq j$ (Рисунок 26). С увеличением количества получаемой информации (количества датчиков многоэлементного датчика) на реконструируемом сектор-скане более отчётливо прорисовывается дефект в материале [67].

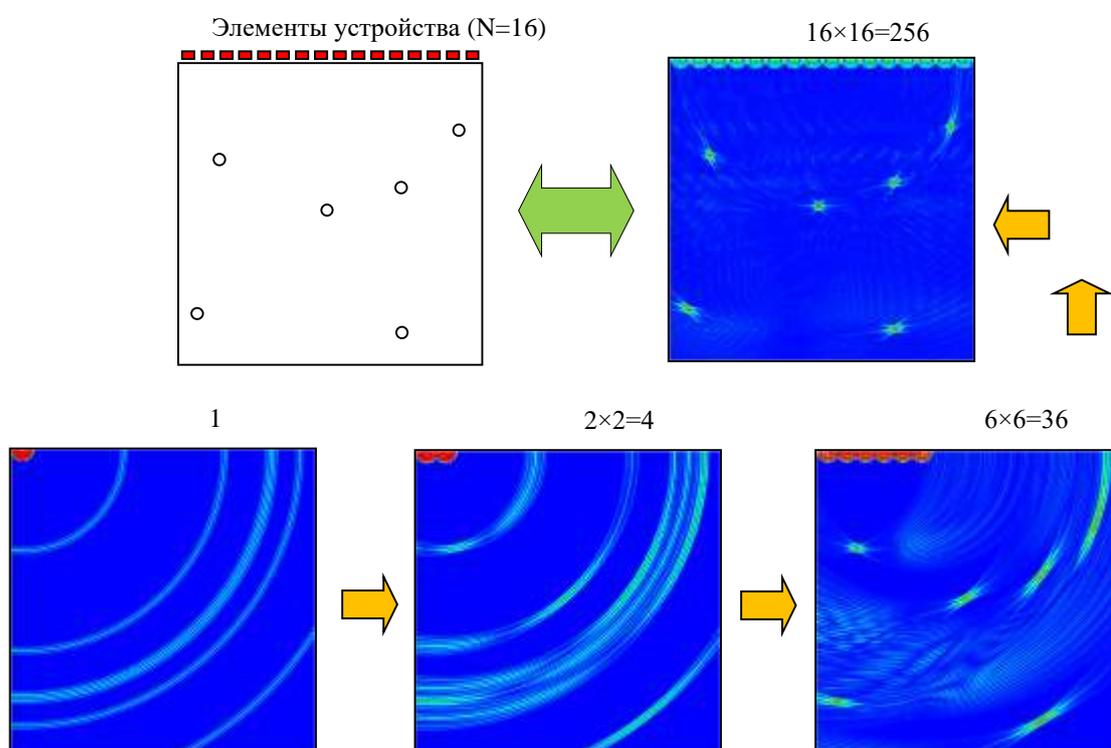


Рисунок 26 – Пример реконструкции сектор-скана для 16-тиэлементного датчика. Времена пробега волн, отражённых шестью отверстиями, формируют изображение по методу DFA

Время пробега звуковой волны каждого элемента призмы для каждой точки объёма может быть рассчитано и занесено в так называемую вспомогательную таблицу. Так можно ускорить процесс реконструкции изображения.

Физически реализуемая зона фокусировки, а значит и улучшенная разрешающая способность техники многоэлементных излучателей в составе призм, ограничивается областью ближнего поля. Это означает, что при большой толщине деталей преимущество метода состоит только в скорости обработки данных и построения изображений. Исходя из размера области исследования, можно сделать вывод, что частота получения и обработки изображений может

достигать килогерца, что соответствует скорости около метра в секунду, при автоматизации измерений.

Возможно улучшить процесс для больших толщин материала, если наложить друг на друга двумерные графики сечений (сектор-сканы) от соседних позиций датчика. Тем самым появится возможность через построение одномерной искусственной апертуры (Рисунок 27) увеличить фокусное пространство [67].

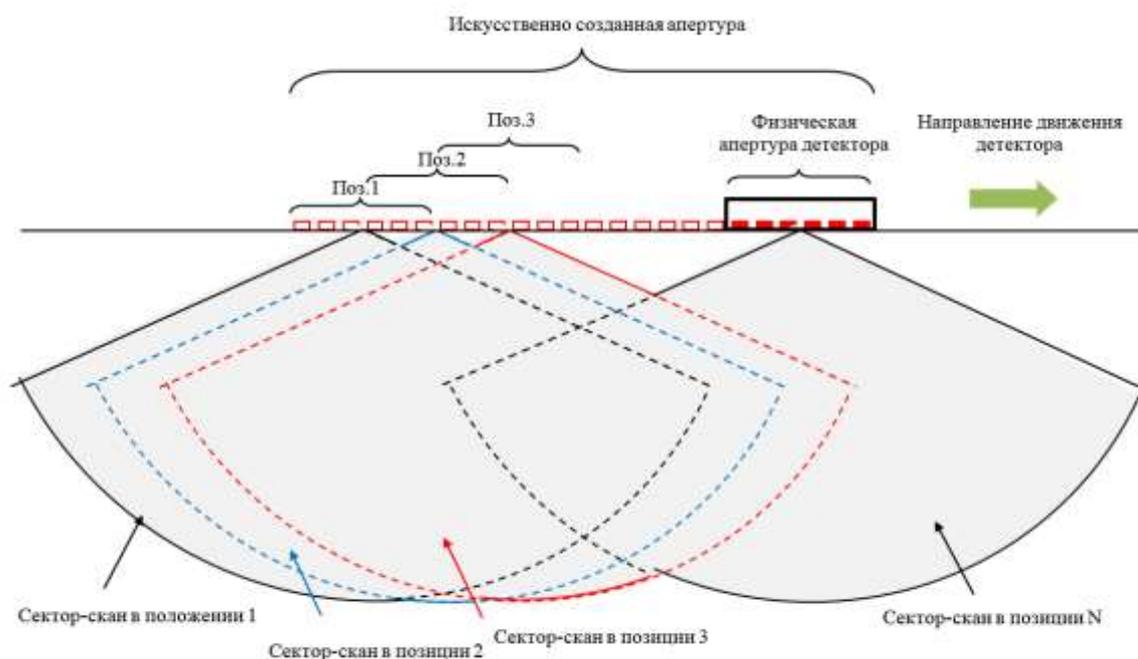


Рисунок 27 – Построение искусственной апертуры

В противоположность классической реконструкции с применением алгоритма SAFT, складываются не отдельные временные сигналы, а двумерные амплитудные поля. Также, как и при SAFT-реконструкции, тем самым увеличивается физически реализуемое фокусное пространство, в котором двумерное поле данных (составной скан) строится в плоскости сечения. Метод цифровой фокусировки сигнала для ультразвуковой реконструкции DFA обладает высокой эффективностью и отличается высокой разрешающей способностью и контрастом.

Но необходимо учитывать, что УЗК тем не менее является относительным методом и имеет принципиальные физические особенности. Поэтому для его реализации необходимо разрабатывать методику для оценки качества каждого определенного объекта. При этом должны быть оценены особенности материала, из которого изготавливается объект и его акустические свойства, а также учтены его конструкционные особенности для правильного выбора параметров метода и аппаратуры. Кроме того, важно обладать информацией о всех возможных типах и видах

несплошностей, которые могут возникать в ОК. В связи с этим необходимо проводить тщательный предварительный анализ ОК. Все эти пункты формируют разработанную методику контроля, которая будет рассмотрена далее.

1.8 Выводы к главе 1

Глава 1 обобщает сведения по основным методам обращения с ОЯТ как в России, так и за рубежом. Приводится сравнение материалов и конструктивных особенностей пеналов сухого хранения зарубежных и отечественных производителей. В ходе анализа было выявлено, что предпочтение отдается металлическим и металлобетонным конструкциям, которые преимущественно герметизируются посредством сварного соединения корпуса и крышки контейнера. Внесенные в конструкцию изменения являются уязвимым местом, наиболее подверженным возникновению дефектов, которые ведут к утечке радиоактивных материалов. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля, позволяющие производить оценку качества контейнеров с ОЯТ, описаны преимущества и ограничения, присущие каждому из методов. В мировой практике основное место занимает применение радиографического и ультразвукового методов контроля. РК сопряжен с излишними дозовыми нагрузками на персонал, а также не способен выявить ряд критических дефектов. К основным недостаткам УЗК относят сложность интерпретации полученных данных и высокие требования к квалификации эксплуатирующего персонала. Вместе с тем, развитие инновационных методик УЗК на основе томографической реконструкции позволит избежать вышеупомянутые недостатки.

Рассмотрены основные принципы ультразвукового неразрушающего контроля, необходимые для дальнейшей реализации промышленной томографии. Показано, что наиболее эффективным представляется использование иммерсионного метода контроля в эхо-импульсном режиме с использованием ФАР. Кроме того, данный раздел обобщает принципы тактирования ФАР и последующей реконструкции секторных и пространственных разверток. Рассмотрены особенности реконструкционных методов, в частности метода применения синтезированной фокусировки сигнала или SAFT.

Разработка основ ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов с ОЯТ включает в себя создание эффективной методики диагностики. Она должна включать в себя указания по реализации инспекции с точки зрения методов сканирования и особенностей используемого измерительного тракта. Одним из преимуществ техники многоэлементных излучателей по сравнению с техникой с одним излучателем является возможность сфокусировать звуковое поле на определённой глубине, что обуславливает выбор данного типа преобразователя. Рассмотрены методы сканирования и визуализации данных контроля, в том числе метод

цифровой фокусировки DFA, который предлагается положить в основу методики контроля сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ. Вместе с тем указана необходимость дополнительного анализа и выявления особенностей контролируемого объекта для обоснования выбора параметров, входящих в методику, что будет более подробно рассмотрено в следующей главе.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛА ДЛЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОЯТ

Разработка предлагаемой в рамках работы методики для количественной оценки качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 на основе УЗК с использованием ФАР для получения трехмерных изображений состоит из следующих основных этапов:

- Создание БД дефектов, наиболее характерных для данного объекта контроля, включающей в себя сведения об их допустимых параметрах.
- Разработка способа обнаружения и распознавания дефектов объекта на основе индикаций ультразвуковой томографии.
- Расчет и обоснование параметров метода и аппаратуры для проведения ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов.

Общая структура разработанной методики автоматизированного контроля сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ приведена в блок-схеме на рисунке 28.

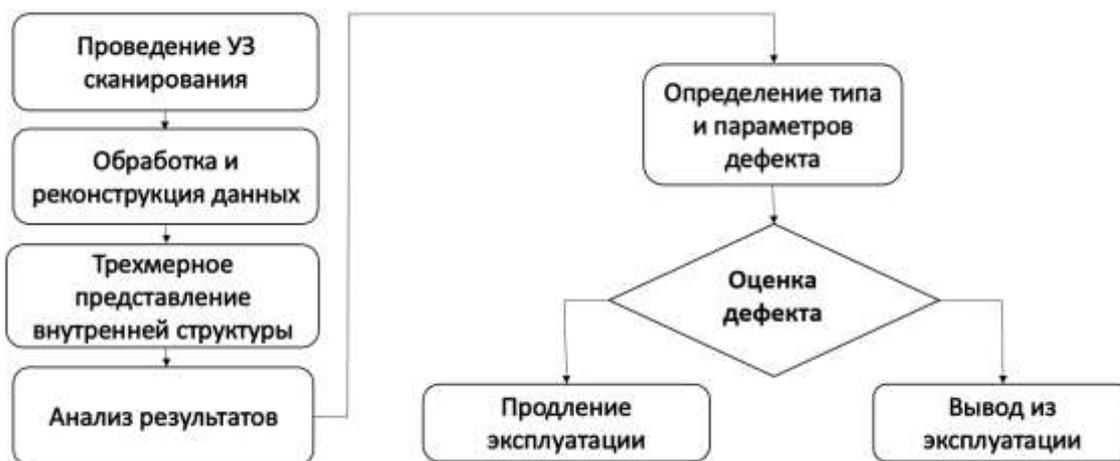


Рисунок 28 – Методика автоматизированного контроля сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ

В данной главе более подробно рассмотрены основные этапы методики. Расчет параметров аппаратуры и метода проведения инспекции непосредственно влияет на проведение эксперимента, поэтому он будет приведен в главе 3.

2.1 Создание БД дефектов пенала для хранения ОЯТ

2.1.1 Характеристика конструкционного материала пенала для хранения ОЯТ

Материалы, которые используются при сооружении конструкций атомной энергетики, должны обладать улучшенными характеристиками. В связи с этим для данной области пригодны не все материалы, используемые в других отраслях техники. При хранении ОЯТ необходимо, чтобы используемый материал обеспечивал прочность, был хорошо свариваемым, а также не был подвержен коррозии и влиянию негативных характеристик агрессивных сред, таких как высокая температура и радиация. Поэтому в качестве материалов элементов атомной энергетики зачастую применяют аустенитные нержавеющие стали. Они применяются для оболочек ТВЭЛов, трубопроводов, парогенераторов и насосов [68]. Металлические пеналы производства ГХК, переназначенные для хранения ОЯТ, также изготавливаются из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Сталь 12Х18Н10Т относится к хромникелетитановым сталям аустенитного класса. Стали данного класса являются нержавеющими. Хром придает материалам данного типа химическую сопротивляемость к окислению, а значит и, антикоррозионные свойства. Никель обеспечивает принадлежность к аустенитному классу.

Аустенитный класс данного типа стали определяет строение ее кристаллической структуры. В общем понимании аустенит представляет собой одну из твердых фаз железоуглеродистых сплавов. Он имеет гранцентрированную решетку, состоящую из атомов гамма-железа, в которую внедрены атомы углерода меньшего размера. Размер атомов углерода больше, чем размер свободного места в гранцентрированной решетке, поэтому при его попадании в решетку железа она искажается, и это делает остальные поры недоступными для других атомов углерода. Структуру аустенита можно стабилизировать с помощью легирования.

Основным существенным недостатком данного типа сталей является склонность к МКК. Она происходит в результате выпадения сложных карбидов железа и хрома. Карбиды могут выпадать вследствие медленного охлаждения по границам зерен, а также изменения структуры под действием внешнего воздействия.

При помощи закалки листовой прокат можно сделать устойчивым к МКК, но при сварке подобных компонентов участки металла будут подвергаться нагреву до температурной области, при которой в любом случае будут выпадать карбиды [69].

Выделение карбидов из твердого раствора вызывает изменение концентрации легирующих элементов, что может привести к частичному структурному превращению и изменению магнитных свойств. Изначально аустенит немагнитен. Образование карбидов

происходит преимущественно по границам зерен, где имеется наибольшее обеднение твердого раствора углеродом и хромом, что сообщает стали склонность к МКК.

Для того, чтобы понизить вероятность возникновения и развития дефектов, можно снижать содержание углерода до предела растворимости аустенита. Либо необходимо легировать сплав элементами, которые обладают большим сродством к углероду, чем хром и железо. Это значит, что соединение с углеродом будет в первую очередь происходить с легирующим веществом. Для этих целей хромоникелевые стали легируют титаном. Титан способствует образованию ферритной структуры в материале. В других странах, например, в США, также используют ниобий [70].

Помимо легирования титаном в рассматриваемую сталь также добавляют и другие элементы, такие как марганец (до 2 %), который облегчает температурную и механическую обработку, а также повышает коррозионностойкость; кремний (0,8 %), который повышает окислительную стойкость; медь (0,3 %) для дополнительной стойкости к коррозии. Полный состав стали 12X18H10T приведен в таблице 2 [71].

Таблица 2 – Химический состав стали 12X18H10T

| С | Cr | Ni | Cu | Ti | Fe | Si | Mn | S | P |
|--------------|---------|--------|-------------|---------|------------|-------------|-----------|--------------|---------------|
| до 0,12 % | 17-19 % | 9-11 % | до 0,3 % | 0,4-1 % | до 67 % | до 0,8 % | до 2 % | до 0,02 % | до 0,035 % |

Свойства легирующих элементов очень разные, поэтому благодаря добавлению определенных примесей можно получить изделия из одной марки аустенитной стали, но обладающие различными свойствами, например, коррозионной стойкостью, холодостойкостью или жаропрочностью. В связи с этим, из сталей данного типа можно изготавливать компоненты, предназначенные для использования в различных сферах. Кроме того, это связано с ее хорошей свариваемостью. При этом требования к свойствам сварных соединений будут отличаться, что определяет технологию сварки. Для получения сварного соединения с необходимыми свойствами, помимо выбора состава металла, так же важно правильно осуществить выбор сварочных материалов и режима сварки. Вне зависимости от количества легирующих примесей и последующего назначения изготавливаемого компонента, сварка аустенитных сталей обладает рядом особенностей, рассмотренных далее.

2.1.2 Особенности сварки аустенитных сталей

Основные трудности сварки, рассматриваемой стали, связаны с особенностями легирующих элементов. Главным недостатком при сварке аустенитных сталей является

склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, имеющих межкристаллитный характер.

В околошовной зоне под действием термического цикла сварки снижаются пластические и прочностные свойства, что может привести к образованию в этой зоне трещин. Образование горячих трещин связано с формированием при сварке крупнозернистой макроструктуры, особенно выраженной в многослойных швах, когда кристаллы последующего слоя продолжают кристаллы предыдущего слоя, и наличием напряжений усадки. Кроме того, при дальнейшей эксплуатации в этой зоне могут выделяться мелкодисперсные карбиды и интерметаллиды. Образование непрерывной прослойки карбидов и интерметаллидов по границам зерен приводит к охрупчиванию шва [72]. В связи с этим необходимо применять специальные режимы сварки.

На сегодняшний день существуют несколько технологий сварки хромоникелевых аустенитных сталей, которые помогают минимизировать вероятность возникновения дефектов:

- аргодуговая сварка с использованием вольфрамового электрода;
- сварка с покрытыми электродами;
- аргоновая полуавтоматическая сварка с применением нержавеющей проволоки.

Технология с применением вольфрамовых электродов (аргодуговая сварка) оптимальна для сваривания изделий, к которым выдвигаются особые требования по качественным показателям, например, при необходимости соединения конструкций из тонкого металла. Чаще всего она используется для сваривания трубопроводов, но и в случае производства пенала для хранения ОЯТ также использовался данный тип сварки. Рассмотрим данный тип сварки более подробно (Рисунок 29).

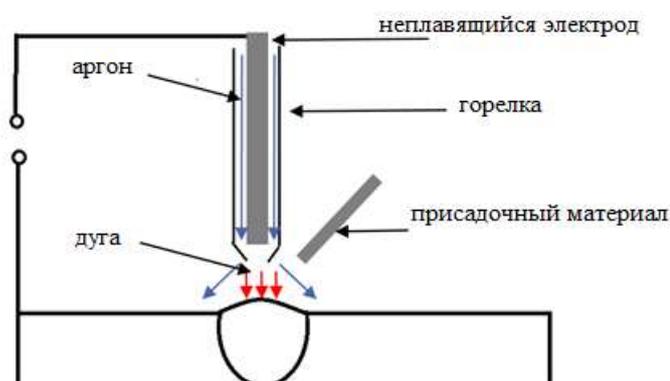


Рисунок 29 – Принцип осуществления дуговой сварки

Дуговая сварка относится к термическому типу, а источником тепла в зоне сварки служит электрическая дуга. Основная часть тепла генерируется за счет дугового разряда. Под его действием торец плавящегося электрода или присадочного материала расплавляются, а при их затвердевании образуется сварное соединение.

В общем случае аргонодуговая сварка может быть с плавящимся и неплавящимся электродами. Неплавящимся электродом чаще всего является вольфрамовый электрод, вокруг которого находится керамическое сопло, из которого во время сварки выделяется инертный газ, в данном случае – аргон. Преимущества аргона заключаются в том, что он практически не вступает во взаимодействие с расплавленным металлом, а также то, что он тяжелее воздуха, следовательно, вытесняет его из зоны сварки [73].

Повышение качества также возможно посредством автоматизации процесса аргонодуговой сварки. Можно разделить степени автоматизации на ручную, автоматическую и полуавтоматическую аргонодуговую сварку. Принципиальное отличие заключается в том, что в первом случае горелка и присадочный материал находится в руках сварщика, а во втором они перемещаются без его участия, т.е. автоматически.

Механизированные способы сварки, обеспечивая равномерное проплавление основного металла по длине шва и постоянство термического цикла сварки, позволяют получить и более стабильные структуры на всей длине сварного соединения.

Наиболее характерными дефектами при дуговой сварке, являются частые кратеры, которые образуются при обрыве дуги из-за неравномерности плавления электродной проволоки по длине шва (т.к. скорость плавления электрода в начале меньше, чем в конце). Появляющиеся дефекты ведут к снижению прочности и эксплуатационной надежности изделия.

Помимо возможного возникновения кратеров, в сварные соединения из аустенитной стали появляются и другие типы дефектов. Так как их спектр достаточно велик, необходимо провести анализ и выявить все типы возможных дефектов и особенности их потенциального расположения в объекте контроля. Это позволит провести более точную оценку качества пенала в дальнейшем.

В рамках написания диссертационной работы проведена классификация основных типов дефектов сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ и составлена соответствующая БД.

2.1.3 Анализ требований к качеству сварных соединений пенала для хранения ОЯТ

Дефекты рассматриваемого ОК, пенала для хранения ОЯТ, могут возникать как в основном материале, так и в металле сварного соединения.

Как было рассмотрено ранее, каждому виду сварки будут соответствовать свои типы дефектов. Но в основном отличия будут связаны с тем, осуществлялась ли сварка давлением или плавлением. Рассматриваемая аргонодуговая сварка относится к последнему типу сварки. Для сварных соединений, полученных плавлением, помимо трещин и кратеров, также свойственны

некоторые дефекты, которые характерны для литого металла, такие как поры, включения и усадочные раковины.

Основной целью анализа и классификации возможных дефектов пенала для хранения ОЯТ является дальнейшая эффективная оценка качества контролируемого изделия с помощью разработки и создания специализированной БД, которая будет содержать всю необходимую информацию. Любые отклонения от заданных норм и требований могут привести к существенным последствиям, которые могут нанести вред окружающей среде и жизни людей.

В связи с этим в атомной отрасли эксплуатация любого из вида оборудования на каждом объекте должна быть согласована с требованиями соответствующих документов.

Согласно НП-035-02 [74] перед вводом пунктов сухого хранения ОЯТ в эксплуатацию, а также периодически в процессе их эксплуатации необходимо проводить проверку работоспособности систем (элементов), контроль состояния металла и сварных соединений систем (элементов) и оборудования пункта хранения.

Также согласно ОСТ 95 10585-2003 [75] необходимо обеспечивать герметичную и надёжную конструкцию для хранения топлива, которая должна быть рассчитана на эксплуатацию без нарушений на период до 50 лет.

Это обуславливает необходимость применения эффективных методов по контролю качества оборудования для хранения ОЯТ.

Согласно ПНАЭ Г-010-89 [76] в секторе атомной энергетики должны применять как методы разрушающего, так и неразрушающего контроля.

Контроль сварных соединений согласно данным правилам должен осуществляться методами визуального, измерительного и радиографического или визуального, измерительного и ультразвукового контроля.

Вместе с тем, требования по осуществлению контроля качества рассматриваемого объекта выставляются согласно ОСТ 95-39-2002 [76].

Сварные соединения подлежат контролю следующими методами:

- визуальным;
- измерительным;
- капиллярным;
- радиографическим.

Так как ультразвуковые методы на данный момент недостаточно развиты, в нормативных документах отсутствуют требования и соответствующие методики для контроля качества сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ акустическими методами.

Данная проблема решается в диссертационной работе за счет создания методики автоматизированной оценки качества сварных соединения на основе ультразвуковой

томографии, которая позволит достичь необходимого уровня точности в сравнении с требованиями, предъявляемыми к качеству результатов, получаемых рентгеновскими методами.

Поэтому для оценки качества ОК за основу были выбраны требования, которые предъявляются разработчиком пеналов (ГХК) согласно ОСТ 95-39-2002 [76]. Максимально допустимые размеры, количество и суммарная приведенная площадь включений и скоплений в соответствии с данным документом указаны в Приложении А.

Принимаем в расчет, что исследуемое герметизирующее сварное соединение между корпусом и крышкой, требующее наиболее тщательного контроля, относится ко второй категории. Остальные присутствующие соединения относятся к четвертой категории.

Помимо данного нормативного документа, за основу разработки требований к максимально допустимым размерам и возможному расположению предполагаемых типов дефектов сварных соединений был также взят Стандарт организации ОАО «Газпром» – СТО Газпром 2-2.4-083-2006 [77]. Этот документ освещает общие требования к дефектам, обнаруживаемым ультразвуковыми методами контроля в зависимости от геометрических особенностей трубопроводов (толщины стенки пенала в исследуемом случае). Требования к основным типам дефектов сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ, разработанные на основе данного документа, приведены в Приложении Б. Основные типы дефектов определены согласно разработанной классификации, приведенной в следующем разделе.

Таким образом, при дальнейшем создании специализированной БД в ней были учтены как отраслевые требования, предъявляемые к используемому классу объектов, так и общие требования, предъявляемые к результатам УЗК при инспекции цилиндрических тонкостенных конструкций. Так как требования, представленные в Приложении Б, являются всеобъемлющими и соответствующими современному уровню развития ультразвуковых технологий, то именно они были взяты за основу при создании БД.

2.1.4 Классификация основных дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ

В общем случае все дефекты определяются как несплошности. Под несплошностью понимают общее наименование нарушений целостности структуры: трещин, отслоений, прожогов, свищей, пор, непроваров и включений. Дефектом являются только те несплошности, которые превышают допустимые нормы для конкретных ОК.

Самым критическим типом дефекта являются трещины. Трещины являются дефектом, представляющимся в виде разрыва материала. Они могут быть:

- продольными (вдоль сварного шва);
- поперечными (поперек сварного шва);

- разветвленными (ответвления в разных направлениях);
- кратерными (в кратере валика сварного шва);
- радиальными (несколько трещин выходящих из одной).

Основными причинами возникновения трещин являются: жесткая конструкция изделия, сварка в жестко закрепленных приспособлениях, большой временной промежуток между сваркой и термообработкой, большая скорость охлаждения, нарушение технологии, нарушение защиты, некачественный основной металл.

Трещины представляют собой группу недопустимый дефектов, в случае обнаружения данного типа дефекта дальнейшая эксплуатация изделия считается невозможной (Рисунок 30) [78].

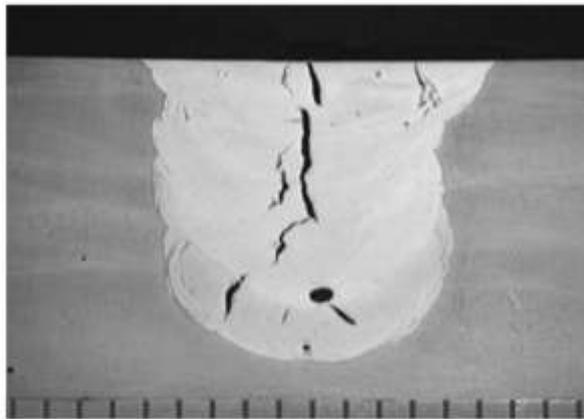


Рисунок 30 – Металлографическое изображение трещины сварного соединения

Второй группой дефектов, представляющих наибольшую опасность с точки зрения безопасной эксплуатации сварных конструкций, являются поры (Рисунок 31) [79].

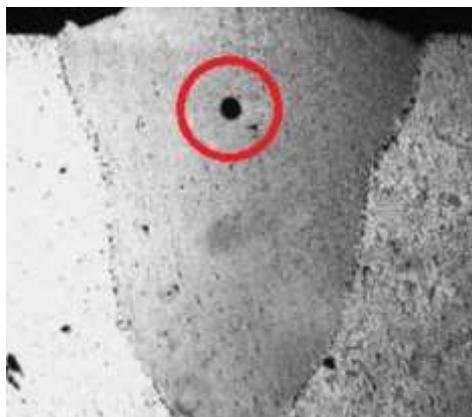


Рисунок 31 – Металлографическое изображение поры в сварном соединении

Они возникают в результате выделения газов при первичной кристаллизации металла. Поры могут располагаться по оси шва, по его сечению, а также вблизи границы сплавления. Кроме того, они могут располагаться внутри изделия или выходить на поверхность. Если поры выходят на поверхность, их также можно называть свищами. По расположению очень важно уделить внимание тому, что поры могут располагаться единично, цепочками или группами. При осуществлении контроля качества характер локализации играет важную роль, так как для разных изделий требования надежности могут отличаться. Основную опасность наличие пор представляет в связи с тем, что в дальнейшем из них могут развиваться различного вида трещины.

С точки зрения обнаружения выходящие на поверхность поры или свищи доступны при визуальном контроле, но для определения наличия дефектов внутренней структуры требуется проведение неразрушающего контроля.

Как уже было сказано, в зависимости от требований, предъявляемых к изделию, поры могут быть как допустимым, так и недопустимым дефектом. Например, для компонентов, работающих под нагрузками или в условиях вакуума, поры являются недопустимым дефектом. Для пеналов для хранения ОЯТ поры являются допустимым дефектом в случае, если их диаметр не превышает предельно допустимой величины. Кроме того, это может также зависеть от особенностей расположения обнаруженных пор. Более подробно эта классификация приведена в Приложении Б.

Кроме наличия полостей, заполненных воздухом, в контролируемом объекте также могут встречаться включения. Это другой тип дефекта, так как заполнение в данном случае предполагается шлаком или инородным металлом. В общем случае поры можно также отнести к данной категории дефектов (Рисунок 32) [79].

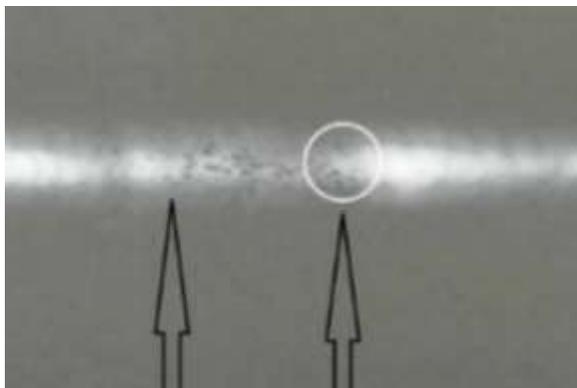


Рисунок 32 – Радиографическое представление включений в сварном соединении

Для пены для хранения ОЯТ характерным включением являются вольфрамовые включения, так как сварка осуществляется при помощи вольфрамового электрода (Рисунок 33) [79]. Данные включения могут иметь круглую или продолговатую форму и являются концентраторами напряжений.



Рисунок 33 – Радиографическое представление вольфрамовых включений на рентгеновских снимках

Основными причинами возникновения шлаковых дефектов можно назвать некачественную подготовку поверхности, некачественный основной металл, нарушение технологии сварки или защиты (в данном случае аргона) (Рисунок 34) [78].



Рисунок 34 – Металлографическое изображение шлаковых включений

Такой тип дефекта, как свищ, уже рассмотрен выше и определен как частный случай поры, вышедшей на поверхность. Это сделано с точки зрения идентичной природы происхождения этих дефектов, но с точки зрения особенностей расположения, необходимо уделить ему отдельное внимание.

Форма и положение свища зависят от режима затвердевания и вида газа. Обычно свищи скапливаются и распределяются «елочкой» (Рисунок 35) [79].

Свищи возникают, как правило, при сварке угловых швов в различных пространственных положениях, отличных от нижнего. Причиной образования свищей является тот факт, что подъемная сила не может выдавить пору наружу сквозь металл сварного шва.

Свищи относятся к недопустимым дефектам, являясь при этом концентраторами напряжений в сварном шве.



Рисунок 35 – Внешний вид сварного соединения со свищами

Еще одним типом дефектов, которые возможно определить визуально, являются кратеры (Рисунок 36) [80]. Они представляют собой углубления, образующиеся в конце шва при внезапном прекращении сварки. Особенно часто кратеры возникают при выполнении коротких швов. Размеры кратера зависят от величины сварочного тока. Они снижают прочность сварного соединения, так как концентрируют напряжения.



Рисунок 36 – Внешний вид сварного соединения с кратером

Важной группой дефектов, которые наиболее характерны для сварных соединений являются несплавления и непровары (Рисунок 37) [78].

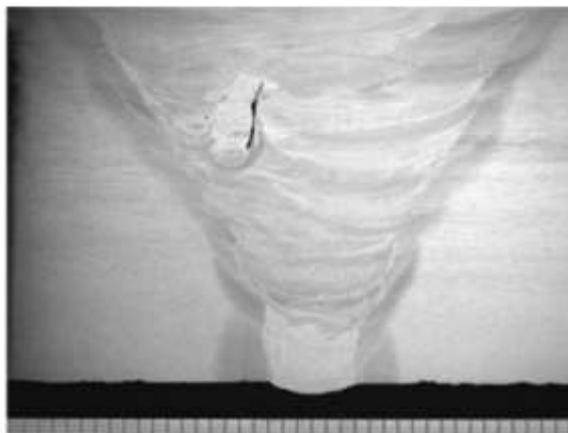


Рисунок 37 – Радиографическое представление непровара

При дуговой сварке в некоторых условиях образуется дефект, характерный отсутствием сплавления между основным металлом и металлом сварочной ванны по части периметра, а иногда и по всему периметру шва.

Несплавление наблюдается при оплавлении кромок основного металла и достаточном объеме металла сварочной ванны. Начальной стадией дефекта являются глубокие подрезы по границе шва с одновременным увеличением утолщения, конечной его стадией – отсутствие сплавления практически по всему периметру шва.

Непровары являются дефектами в виде местного несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления поверхностей или кромок ранее выполненных валиков. Непровары, в виде несплавления основного металла с наплавленным металлом, представляют собой тонкую прослойку оксидов, а в некоторых случаях – грубую шлаковую прослойку между основным и наплавленным металлом.

Кроме того, при сварке могут возникать и другие дефекты, которые являются внешними и могут быть обнаружены с помощью визуального контроля, это дефекты формы шва. Например, такие как смещение кромок (Рисунок 38) [79].

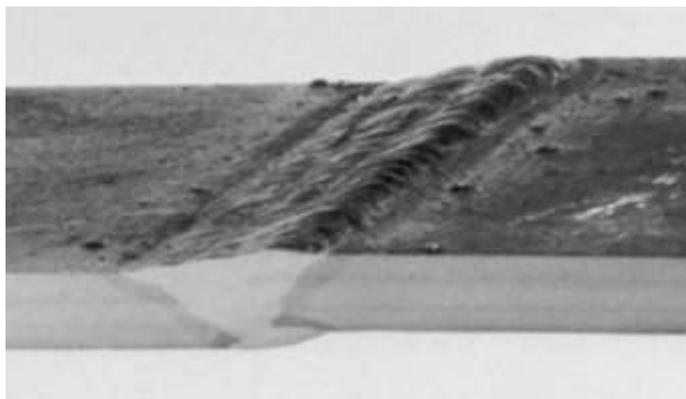


Рисунок 38 – Дефекты формы шва

Согласно приведенной классификации типов возникающих дефектов и требованиям к качеству сварных соединений составлена БД. Она содержит в себе численные требования, которые были рассчитаны в соответствии с геометрическими параметрами пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000, приведенными в разделе 1.2 и соответствует нормативным требованиям, рассмотренным в разделе 2.2. Для расчета допустимых норм каждого из типов дефектов были использованы формулы из таблицы Приложения Б, при учете что:

- высота дефекта (h), мм – линейный размер проекции дефекта по высоте шва на плоскость, перпендикулярную оси трубопровода или на плоскость, проходящую через дефект и ось трубопровода;

- диаметр дефекта (d), мм – максимальный линейный размер дефекта сферической формы;

- длина дефекта – линейный размер проекции дефекта вдоль шва на плоскость, перпендикулярную оси трубопровода;

- длина дефекта вдоль шва (l_l), мм – линейный продольный (вдоль оси шва) размер проекции дефекта на плоскость, перпендикулярную оси трубопровода (для вытянутых в кольцевом направлении дефектов);

- длина дефекта поперек шва (l_t), мм – линейный поперечный (поперек оси шва) размер проекции дефекта на плоскость, проходящую через дефект и ось трубопровода (для дефектов, вытянутых в направлении оси трубы);

- расстояние между соседними дефектами (L), мм – минимальное расстояние между границами соседних дефектов;

- суммарная максимально допустимая протяженность дефекта (совокупности дефектов) ($\sum D$), мм – допустимая величина суммы длин дефектов (совокупности дефектов) вдоль шва;

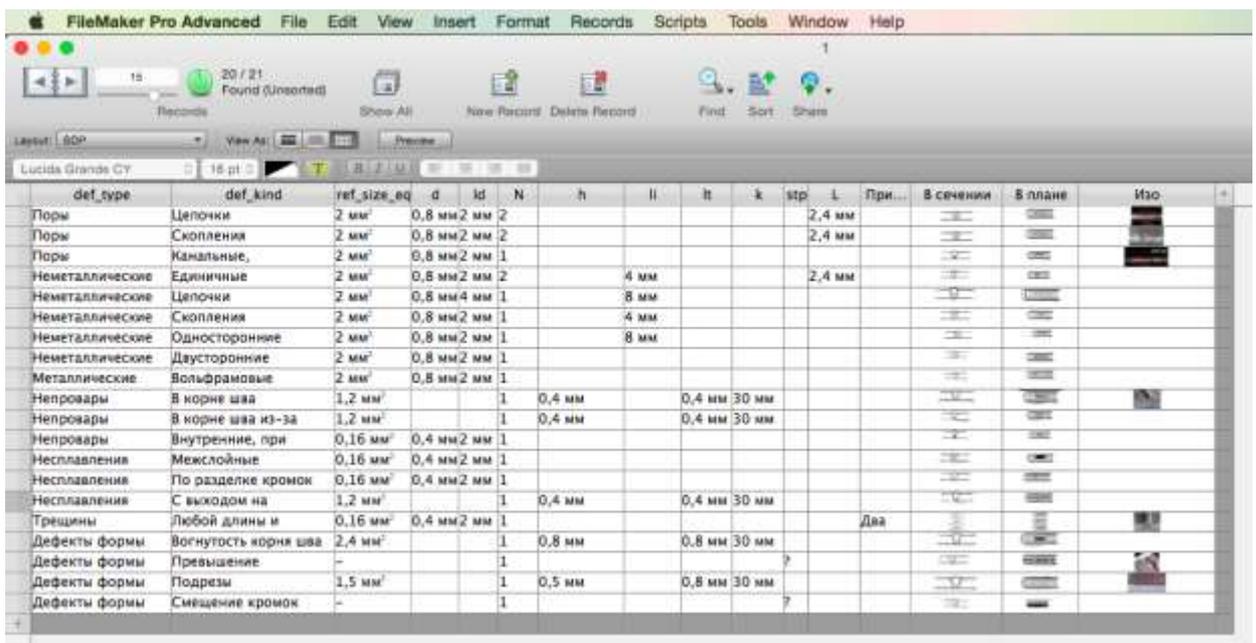
- толщина стенки трубы (S), мм – минимальная фактическая толщина стенки трубы в зоне сварного соединения.

Для проведения количественной оценки обнаруживаемых дефектов, разработанная БД была реализована в виде программного средства для автоматизации данного процесса. Конечным результатом ее использования является предоставление оператору контроля данных о допустимости определенного типа дефекта и его основных характеристиках, включая его размеры и расположение.

2.1.5 Программная реализация БД дефектов сварных соединений пенала для хранения ОЯТ

БД реализована с помощью стандартного ПО. Также возможно установление связи между ПО контроля и разработанной БД для реализации автоматической оценки качества.

Реализация БД представлена в программе FileMaker Pro Advanced. БД оформляется в виде таблицы значений переменных. Разработанная БД предусматривает возможность дополнения оператором. Это может быть использовано при изменении ОК, а значит, и возможных дефектов. Таблицы с переменными данными, соответствующими параметрам дефектов (Рисунок 39) заполняются автоматически при установке программы с учетом предустановленных связей (Рисунок 40) между переменными, организуемых оператором БД. Так, на базе программы FileMaker Pro Advanced определяется зависимость между агрегированными и суммаризированными данными информационной БД дефектов сварных соединений пеналов с ОЯТ.



| def_type | def_kind | ref_size_eq | d | ld | N | h | li | lt | k | stp | L | При... | В сечении | В плане | Изо |
|-----------------|----------------------|----------------------|--------|------|---|--------|------|--------|---|-------|--------|--------|-----------|---------|-----|
| Поры | Целочные | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 2 | | | | | | 2,4 мм | | | | |
| Поры | Скопления | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 2 | | | | | | 2,4 мм | | | | |
| Поры | Канальные | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Неметаллические | Единичные | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 2 | | 4 мм | | | | 2,4 мм | | | | |
| Неметаллические | Целочки | 2 мм ³ | 0,8 мм | 4 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Неметаллические | Скопления | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 1 | | 4 мм | | | | | | | | |
| Неметаллические | Односторонние | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 1 | | 8 мм | | | | | | | | |
| Неметаллические | Двусторонние | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Металлические | Вольфрамовые | 2 мм ³ | 0,8 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Непровары | В корне шва | 1,2 мм ³ | | | 1 | 0,4 мм | | 0,4 мм | | 30 мм | | | | | |
| Непровары | В корне шва из-за | 1,2 мм ³ | | | 1 | 0,4 мм | | 0,4 мм | | 30 мм | | | | | |
| Непровары | Внутренние, при | 0,16 мм ³ | 0,4 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Несплавления | Межслойные | 0,16 мм ³ | 0,4 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Несплавления | По разделке кромок | 0,16 мм ³ | 0,4 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | | | | |
| Несплавления | С выходом на | 1,2 мм ³ | | | 1 | 0,4 мм | | 0,4 мм | | 30 мм | | | | | |
| Трещины | Любой длины и | 0,16 мм ³ | 0,4 мм | 2 мм | 1 | | | | | | | Да | | | |
| Дефекты формы | Вогнутость корня шва | 2,4 мм ³ | | | 1 | 0,8 мм | | 0,8 мм | | 30 мм | | | | | |
| Дефекты формы | Превышение | - | | | 1 | | | | | | | | | | |
| Дефекты формы | Подрез | 1,5 мм ³ | | | 1 | 0,5 мм | | 0,8 мм | | 30 мм | | | | | |
| Дефекты формы | Смещение кромок | - | | | 1 | | | | | | | | | | |

Рисунок 39 – Пример заполнения таблицы БД

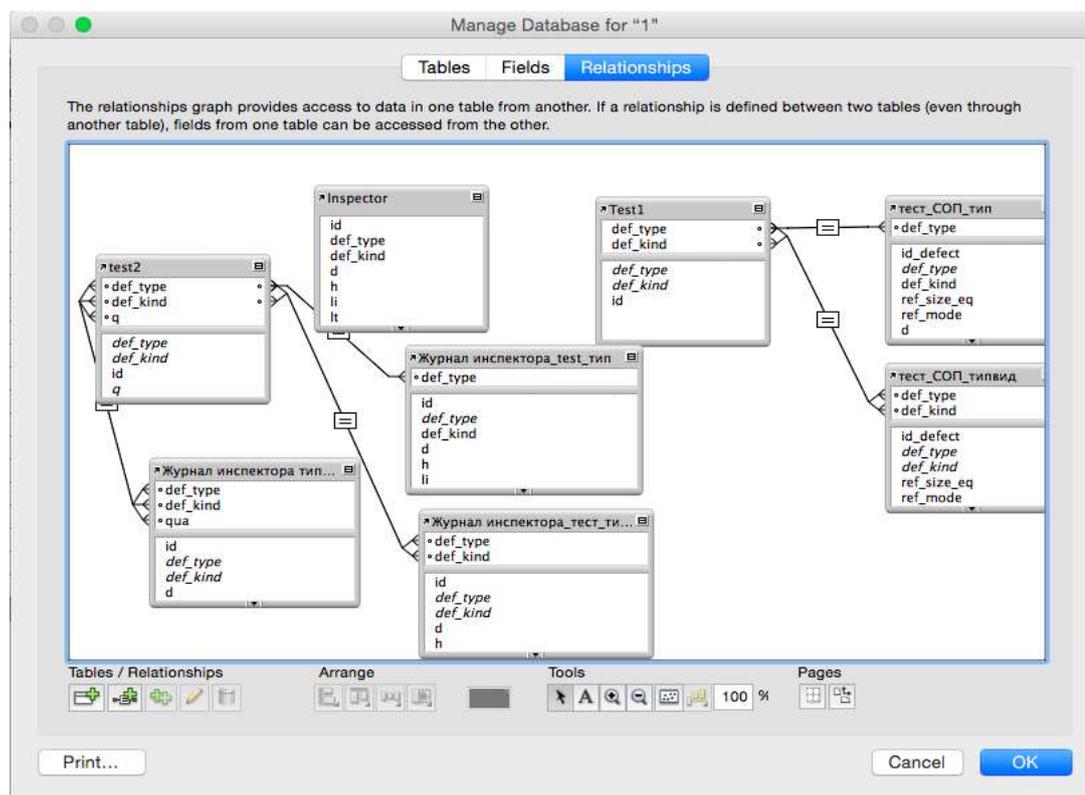


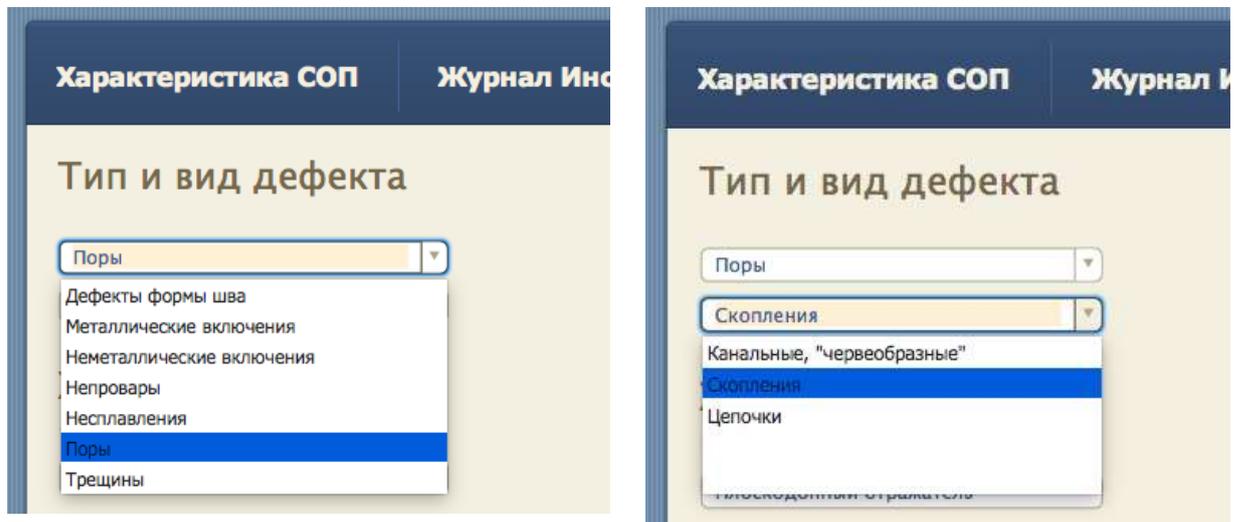
Рисунок 40 – Организация связей переменных в таблице БД

Кроме возможности определения является ли обнаруженная несплошность при ультразвуковом контроле дефектом или нет, БД также предоставляет характеристики для разработки СОП в случае изменения ОК. Для демонстрации получаемых выходных данных о характеристиках СОП, а также данных о допустимых дефектах предложено представление значений для пользователя в отдельных окнах согласно организованной таблице.

Так, исходя из заданных оператором условий, согласно структуре внутримашинной информационной БД определяются свойства выходных данных (зависимость наличия той или иной характеристики от нулевого или ненулевого значения поля в БД).

Окно «Характеристика СОП» предлагает выбор значения входных данных согласно структуре БД (тип и вид дефекта). Таким образом, пользователь имеет возможность получить связанные выходные значения согласно заданной им комбинации. Обязательным полем является указание «типа эталонного отражателя». Остальные выходные значения, такие как размеры отражателя и его эквивалентная площадь, выводятся автоматически в зависимости от типа отражателя и выбора значений выходных данных. Так, при выборе в поле «Тип дефекта» значения «Поры» (Рисунок 41, а) и, в соответствии с этим, в выпадающем поле «Вид дефекта» выборе значения «Скопления» (Рисунок 41, б), выходными данными, отображаемыми пользователю, являются соответствующие поля в разделе Характеристики (Рисунок 42, а) и

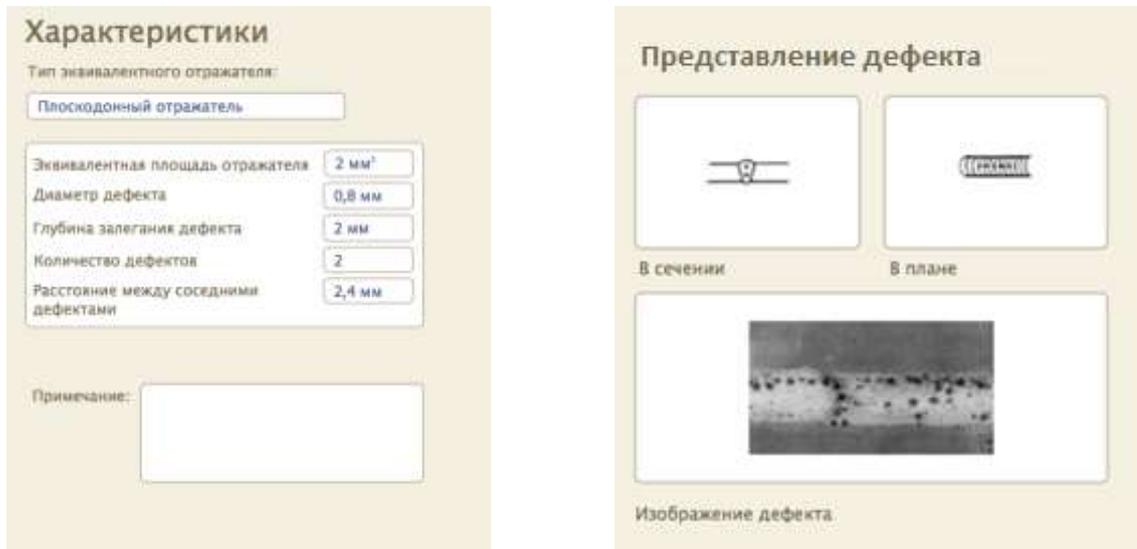
графические данные (Рисунок 42, б). В целом, окно «Характеристика СОП» представлено на рисунке 43 с учетом выбора тех или иных входных условий.



а) поле «Тип дефекта»

б) поле «Вид дефекта»

Рисунок 41 – Отображение выпадающих списков



а) «Характеристики»

б) «Представление дефекта»

Рисунок 42 – Отображение зависимых выходных данных относительно дефекта

Рисунок 43 – Окно «Характеристика СОП» с указанием зависимых входных и выходных данных

Аналогичным образом организовано окно «Журнал оператора». Имеется возможность выбора значений входных данных в поле «Тип дефекта», например, значения «Неметаллические включения» (Рисунок 44, а). В зависимости от этого предоставляется выпадающее окно в поле «Вид дефекта», значение «В скоплении» (рисунок 44, б), а далее соответственно появляется выпадающее зависимое поле «Качество сварки» с возможностью выбора, например, значение «В» (Рисунок 44, в). Общий вид журнала оператора представлен на рисунке 45.

а) «Тип дефекта»

б) «Вид дефекта»

в) «Качество сварки»

Рисунок 44 – Пример выпадающих полей для подбора параметров дефекта оператором

Рисунок 45 – Окно «Журнал инспектора» с указанием зависимых входных и выходных данных

Таким образом, при использовании разработанной БД инспектор может получить исчерпывающую информацию не только об искомом дефекте, но и о СОП, который требуется для настройки системы УЗК с целью поиска конкретного типа дефекта в заданном ОК. Описание структуры и внутримашинной организации БД приведено в Приложении В.

Входными данными, в случае оценки допустимости заданного типа дефекта, будут являться количественные параметры индикации УЗК. В связи с этим точное определение значений данных параметров является важной задачей. В рамках работы разработан способ анализа и интерпретации результатов ультразвуковой томографии пеналов для хранения ОЯТ, который рассмотрен далее.

2.2 Способ обнаружения и распознавания дефектов на основе индикаций ультразвуковой томографии

Исходными данными для выполнения количественной оценки дефектов сварных соединений являются трёхмерные воксельные данные, получаемые в результате реконструкции изображения объёма сварного шва по методу DFA.

В общем случае каждый элемент объёма характеризуется отражающей или рассеивающей способностью эквивалентной интенсивности эхо-сигналов от заданного элемента объёма. Таким образом, в результате процедуры реконструкции за счет положительной интерференции амплитуд эхо-сигналов происходит когерентное накопление совпадающих по фазе значений в

элементах объёма, содержащих несплошности. В трёхмерной модели ОК отображаются объёмные индикации, соответствующие фактическим дефектам материала, характеризующимся определенной отражающей и рассеивающей способностями (Рисунок 46).

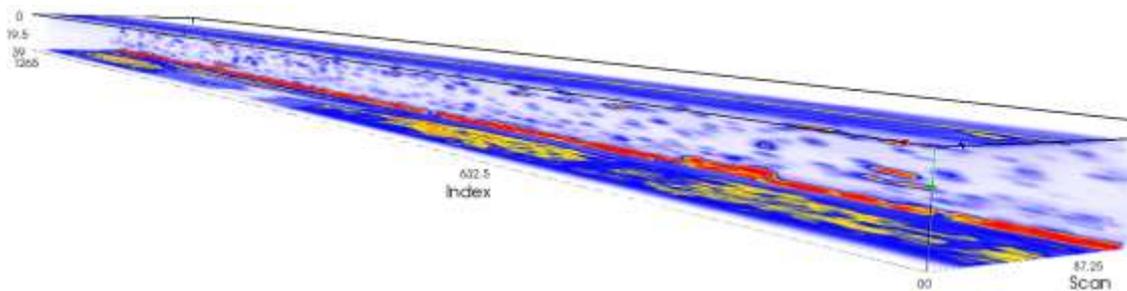


Рисунок 46 – Объёмное представление сварного соединения с несплошностями

Важным при этом является то, что несплошности материала характеризуются объёмной протяженностью в трёх измерениях, значения которой, при корректных параметрах измерения и реконструкции, в общем случае соответствуют реальным размерам дефектов.

Необходимым условием для последующего анализа объёмных индикаций является воксельный, т.е. нетекстурный характер исходных данных, т.к. он позволяет получать произвольные В-, С-, D-развертки (Рисунок 47). Это обуславливает возможность использования стандартных библиотек математической обработки изображений, которые, как правило, реализуются в двухмерных системах координат.

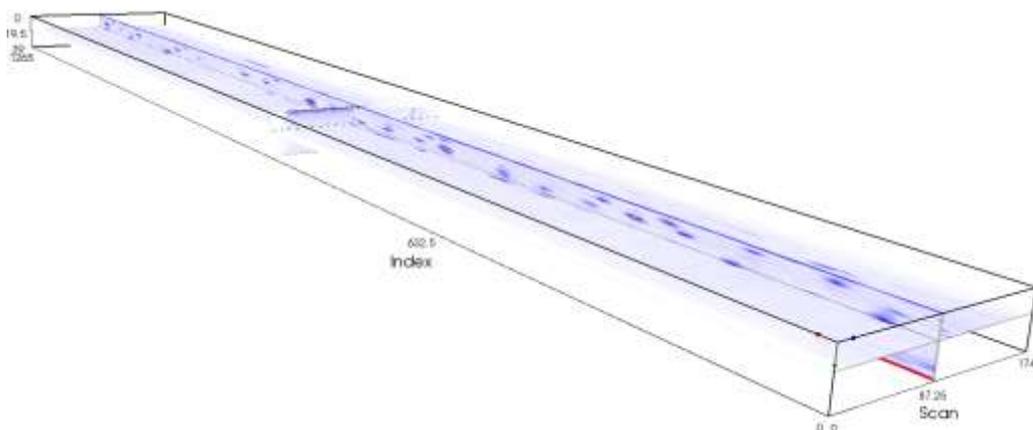


Рисунок 47 – Плоскостное представление трёхмерных данных

Пространственное разрешение объёмных данных является ключевым параметром объёмной реконструкции, одновременно определяющим производительность процедуры контроля, и в то же время отражающим физическую зависимость выявляющей и разрешающей способности ультразвуковой томографии от рабочей частоты ультразвукового преобразователя.

В общем случае, пространственное разрешение должно на порядок превышать длину волны ультразвуковых колебаний. Это является необходимым условием корректного восстановления амплитудно-фазовой информации, содержащейся в исходных эхо-сигналах.

При этом на выявляющую и разрешающую способности накладываются физические ограничения, связанные с процессами отражения и рассеяния ультразвуковых волн от неоднородностей материала. Дефекты с линейными размерами, превышающими длину волны ультразвуковых колебаний, характеризуются множественными явлениями отражения и/или дифракции на границах раздела сред таким образом, что в процессе томографической реконструкции возможно полное восстановление формы дефекта. При этом действует общее правило: чем больше эффективная апертура при проведении ультразвуковых измерений, тем выше качество восстановленного изображения несплошности материала.

Дефекты с геометрическими размерами менее длины волны ультразвуковых колебаний могут выступать только в качестве единичных точечных источников дифракционных сигналов, которые в результате реконструкционного процесса восстанавливаются до индикаций с геометрическими размерами в лучшем случае равными длине волны ультразвука. При размерах несплошностей значительно меньше длины волны ($< 1/10$) выявляющая способность ультразвуковой томографии утрачивается.

Разрешающая способность ультразвуковой томографии ограничена длиной волны ультразвука, поэтому несплошности, расположенные на расстоянии менее длины волны друг от друга, будут отображены как одна индикация, а геометрическая неточность при определении пространственных размеров дефектов может равняться длине волны ультразвуковых колебаний [81].

Особенности объекта контроля будут оказывать существенное влияние на предполагаемые результаты инспекции. Так как УЗК является относительным методом, то для достоверной оценки важно предварительно получить информацию о представлении томографических индикаций в случае обнаружения определенного типа несплошностей. С учетом проведенного анализа дефектов пеналов для хранения ОЯТ была проведена оценка возможных индикаций контроля.

2.2.1 Классификация индикаций ультразвуковой томографии в соответствие с типовыми дефектами пенала для хранения ОЯТ

В общем случае дефекты сварных соединений разделяются на плоские и объёмные. К первой группе относятся все виды трещин и непровары, а также смещение кромок. К объёмным дефектам принадлежат все виды включений и пор.

На основе проведенного анализа выявлены критерии оценки результатов УЗК такие, что плоскостные дефекты типа трещина являются недопустимыми ни при каких условиях, в то время как объёмные дефекты и некоторые виды плоскостных (непровар, несплавление) допускаются при определённом соотношении их геометрических размеров и размеров сварного соединения. Соответственно, фактором, определяющим надёжность применения ультразвуковых методов контроля, является способность достоверно отличать данные типы дефектов друг от друга.

В то время как традиционные методы УЗК ограничены в своей чувствительности к типам дефектов требованием совпадения плоскости раскрытия протяжённых дефектов с направлением ввода акустической волны, преимущество томографического метода является то, что чувствительность обнаружения фактически не зависит от ориентации дефекта. При достаточном количестве направлений излучения акустических волн в каждом элементе объёма, имеющего несплошности материала, эффект когерентного накопления амплитуд сигналов позволяет восстанавливать вторичные дифракционные источники и фактически выявлять все дефекты, геометрические размеры которых превышают длину волны.

Рисунки 48 и 49 демонстрируют реконструированное изображение скопления объёмных включений и изображение плоского непровара.

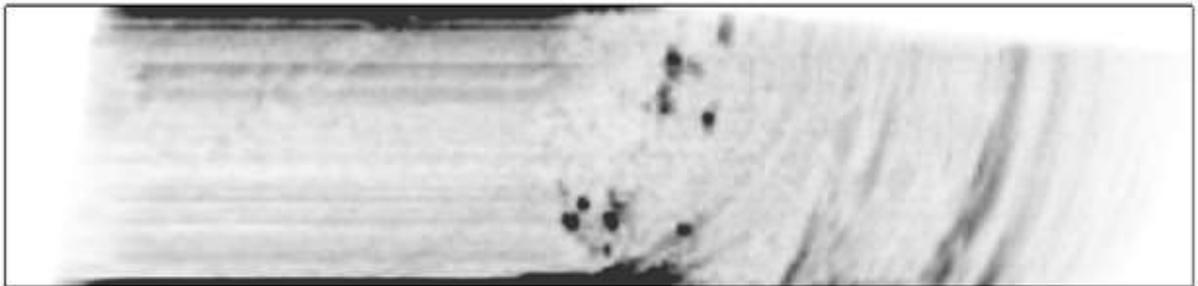


Рисунок 48 – Изображение скопления пор



Рисунок 49 – Изображение непровара

При корректной реконструкции несплошностей материала возможна количественная оценка результатов УЗК, включающая определение всех характеристик дефектов, таких как:

- положение в объёме;
- тип;
- форма и ориентация;
- геометрические размеры.

Рисунок 50 демонстрирует возможности реконструкции изображения коррозионного растрескивания, возникшего под действием механического напряжения с полным восстановлением формы трещины. Данный тип дефекта является недопустимым для исследуемого ОК. Но по томографическому изображению можно сказать, что при данном качестве изображений результаты УЗК могут непосредственно являться входными данными для последующего анализа разрушения конструкционного материала и расчёта остаточного ресурса изделия в процессе эксплуатации [82].

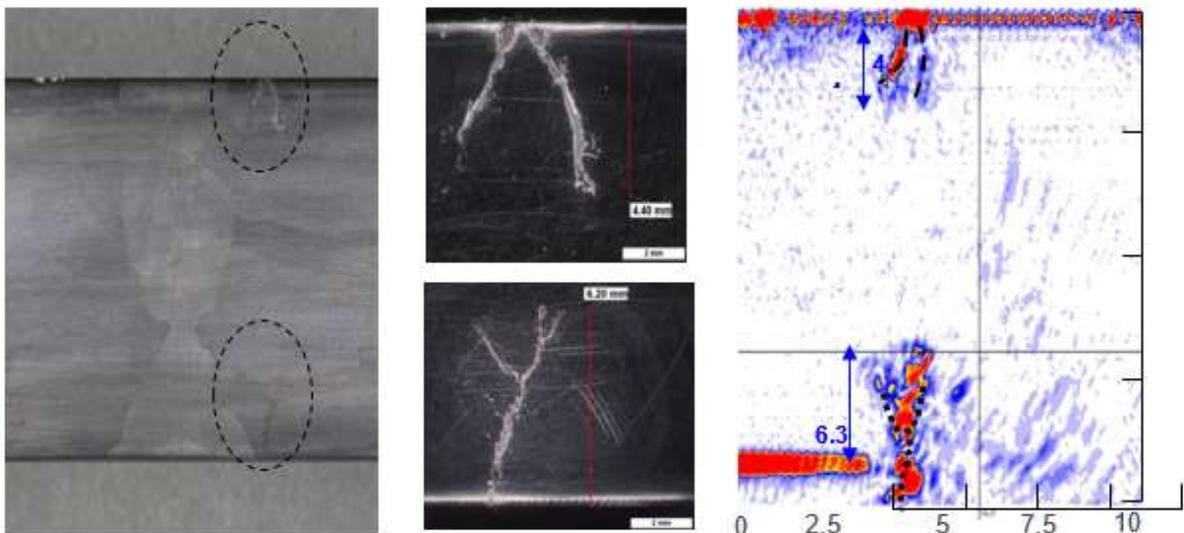


Рисунок 50 – Сопоставление результатов разрушающего и неразрушающего контроля коррозионного растрескивания

2.2.2 Порядок интерпретации несплошностей материала

Ранее показаны возможности количественной оценки дефектов при использовании метода ультразвуковой томографии. Опытный оператор-дефектоскопист при помощи интерактивных измерительных средств (увеличение изображения, курсоры, линейки) в состоянии оценить все характеристические параметры индикаций и дать заключение о пригодности ОК. Однако еще одной задачей, сформулированной в рамках работы, которая должна решаться путем применения предлагаемой методики автоматизированного контроля сварных соединений, является

автоматическая оценка результатов, как с точки зрения повышения производительности, так и в целях снижения зависимости от проявления человеческого фактора.

Несмотря на то, что процедура томографической реконструкции объёмных изображений корректным образом является довольно сложной, восстановленные объёмные представления несплошностей материала могут быть достаточно просто классифицированы, в соответствии с чем в рамках работы был разработан порядок интерпретации результатов контроля. Характеристические признаки, используемые для оценки индикаций в ультразвуковых изображениях, приведены ниже:

а) Пространственное положение

Первичным критерием оценки изображений УЗК и определение дефектов, т.е. автоматического разделения условно истинных и условно ложных индикаций, является геометрическое положение их индикации в контролируемом объёме. Как правило, ОК характеризуется зоной ожидания дефектов, за счет чего артефакты реконструкции могут исключаться из дальнейшего рассмотрения, если они находятся вне установленной зоны ожидания.

б) Амплитуда

В разделе 2.2.1 рассматривались физические ограничения возможностей ультразвуковой томографии, связанные с превышением длиной волны ультразвуковых колебаний размеров несплошностей материала. На практике в большинстве случаев дефекты с геометрическими размерами менее длины волны не являются значимыми, т.е. не приводят к снижению эксплуатационного ресурса объектов. Таким образом, амплитудный порог, устанавливаемый в процессе калибровки чувствительности на искусственном отражателе с заданными геометрическими размерами, не превышающими длину волны ультразвуковых колебаний, позволяет определять нерелевантные индикации и исключать их из дальнейшего рассмотрения при оценке результатов УЗК. Более точно данный параметр определен далее в разделе 3.1.2.

в) Площадь

Следующим ключевым характеристическим признаком для классификации ультразвуковых индикаций является их площадь. В особенности если геометрические размеры индикации превышают длину волны ультразвуковых колебаний, то данный параметр становится критическим для классификации дефекта, т.к. речь идёт либо о крупной несплошности, либо о пространственном скоплении нескольких отражателей, которые могут ухудшать конструкционные свойства материала.

Рисунок 51 демонстрирует процедуру оценки размера площади индикации ультразвуковой томографии, чья площадь превышает заданные пороговые значения.

Как правило все плоскостные дефекты, критические по отношению к качеству материала, имеют близкую к перпендикулярной поверхности ОК ориентацию. Типичное направление распространения трещин – от поверхности вглубь объёма изделия. Непровары и несплавления материала обычно совпадают с подготовкой кромок сварного шва. При этом индикации характеризуются плоскостью раскрытия, т.е. имеют пространственную протяжённость сразу в двух направления – перпендикулярно поверхности и вдоль оси сварного шва.

В то же время объёмные индикации, например, шлаковые включения, а также их скопления, имеют протяжённость во всех трёх пространственных направлениях. Другой тип объёмных дефектов – газовый канал – обычно имеет одномерную протяжённость, совпадающую с направлением движения сварочного электрода, то есть вдоль оси сварного соединения.

На рисунке 53 показана классификация непровара сварного соединения, произведённая по критериям вертикальной пространственной протяжённости и геометрического положения в середине шва.

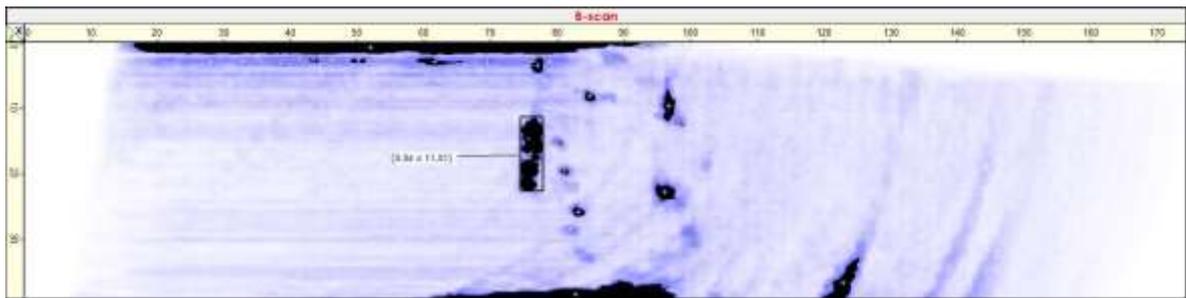


Рисунок 53 – Классификация непровара по пространственной протяженности и геометрическому положению

На рисунке 54 показана классификация трещины в сварном соединении, произведённая по критериям вертикальной пространственной протяжённости и геометрического положения в корне шва.

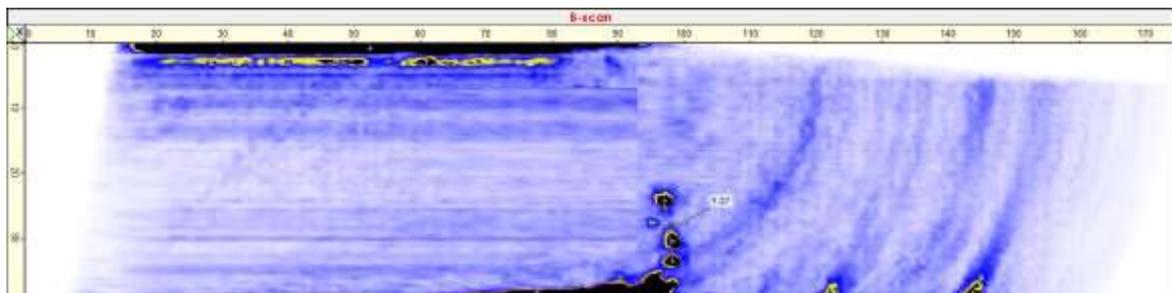


Рисунок 54 – Классификация трещины по пространственной протяженности и геометрическому положению

В данном разделе сформированы характеристические признаки для интерпретации результатов ультразвуковой томографии. Показано, что для классификации типа дефекта необходимо в общем случае применять комплексные критерии анализа характеристических признаков.

Вместе с тем, для того, чтобы принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации ОК, необходимо провести количественную оценку обнаруженных несплошностей при учете указанных признаков. Для этого был разработан способ распознавания дефектов, включающий практическое применение разработанных в данном разделе принципов. Рассмотрим его более подробно.

2.2.3 Разработка способа обнаружения и распознавания дефектов

Как показано ранее, результатом УЗК с использованием ФАР и применением технологии реконструкции методом цифровой фокусировки DFA являются трехмерные изображения внутренней структуры ОК. Каждый элемент таких данных – это амплитуда звуковой волны в соответствующей точке. С целью упрощения восприятия изображений применяется преобразование значения амплитуды в цветовую индикацию. При этом могут использоваться различные методы компьютерной визуализации скалярной воксельной информации, среди которых наиболее популярен метод проекции максимальной интенсивности (Рисунок 55), так как он позволяет показать положение наиболее ярких (с максимальной амплитудой) участков трёхмерного объема.

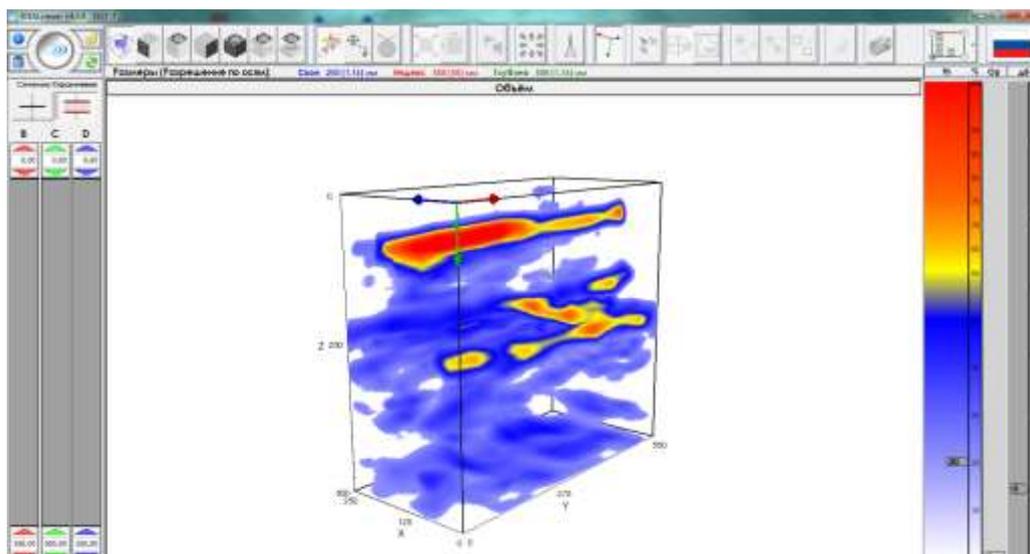


Рисунок 55 – Визуализация методом проекции максимальной интенсивности

Для упрощения и ускорения анализа данных используют ортогональные проекции трехмерных данных: В-, С-, D-развертки. Использование метода проекции максимальной интенсивности позволяет отображать весь объем объекта целиком, поэтому двумерные результаты таких проекций содержат геометрическую информацию о наличии, положении, форме содержащихся внутри дефектов (Рисунок 56).

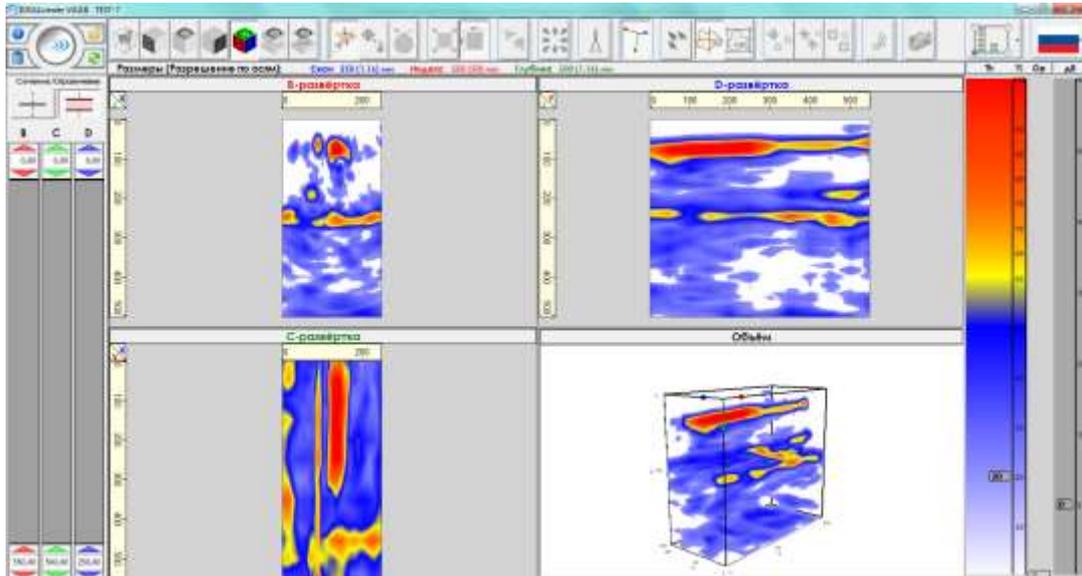


Рисунок 56 – Ортогональные 2D проекции и трехмерная реконструкция

Для наиболее эффективного распознавания дефектов необходимо первоначально задать минимальный порог амплитуды, которой означает, что все значения, превышающие его, будут являться индикациями потенциальных дефектов и на результатах контроля будут отображаться черным цветом (Рисунок 57). После этого можно применять такие простейшие геометрические алгоритмы как поиск центра, размера или расстояний между индикациями, рассмотренные далее.

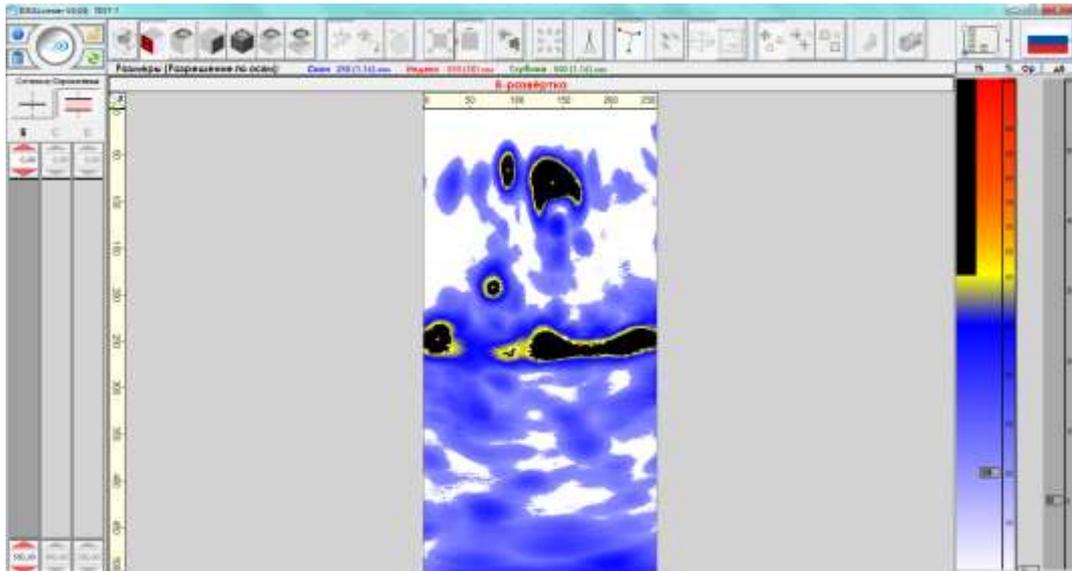


Рисунок 57 – Выделение индикаций дефектов при определенном минимальном пороговом значении амплитуды

а) Центр дефекта

Для определения центра возможно применение нескольких алгоритмов (Рисунок 58):

- Геометрический центр. Центром дефекта является центр масс геометрической фигуры.
- Взвешенный центр. Здесь также речь идет о центре масс с поправкой, что каждому единичному элементу геометрической фигуры присвоен вес, который пропорционален значению амплитуды в данной точке.
- Максимум. Центром дефекта считается точка с наибольшей амплитудой.

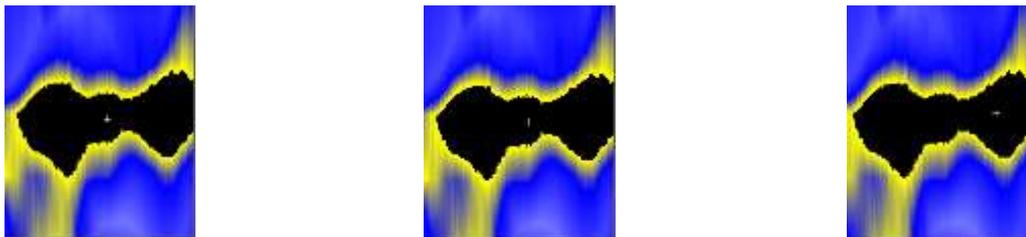


Рисунок 58 – Алгоритмы определения центра дефекта

Первые два алгоритма имеют схожие результаты, в то время как третий указывает на явный пик дефекта даже с неточно подобранном порогом амплитуд. В связи с этим в работе было принято использовать метод определения геометрического центра дефекта.

б) Размер дефекта

В простейшем случае размером дефекта считается его площадь. Также одной из характеристик размера может являться размер прямоугольника, в который вписывается дефект (Рисунок 59).

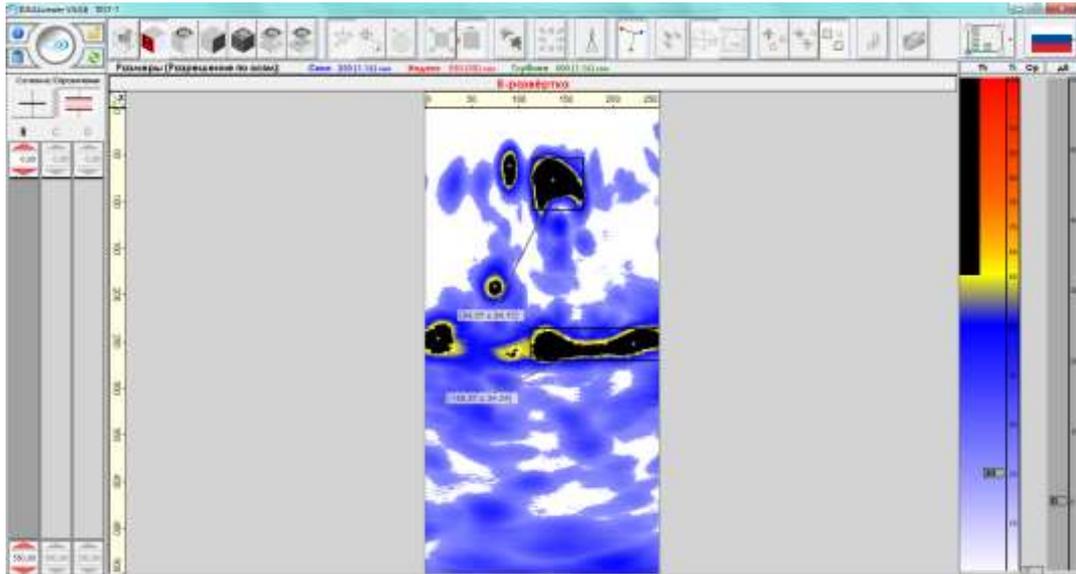


Рисунок 59 – Прямоугольный размер дефекта

Распространены также дефекты достаточно вытянутые, но располагающиеся под углом. В таком случае прямоугольник со сторонами параллельными осям не подходит для описания размера дефекта. В этом случае будет эффективнее найти прямоугольник с максимальным отношением длины к ширине (Рисунок 60).

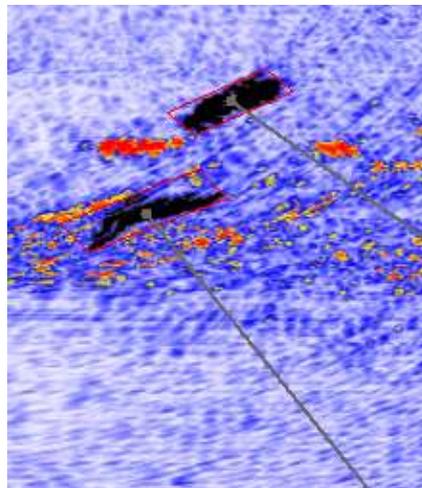


Рисунок 60 – Наклоненный прямоугольный размер дефекта

в) Группировка дефектов

В целях проведения оценки качества иногда целесообразным является объединение группы нескольких малых индикаций в одну. Так, как было сказано выше, скопление пор на расстояниях меньше трех диаметров наибольшей из них будет оценено как один дефект. Таким образом, установив порог максимального разброса (расстояний между отдельными

индикациями), можно к такой группе применять такие же методы анализа, как и к единичному дефекту (Рисунок 61).

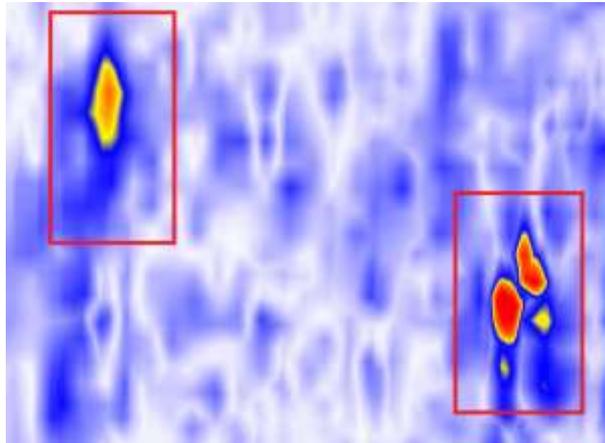


Рисунок 61 – Объединение дефектов в группу

г) Анализ с помощью кривой

Ещё один доступный алгоритм для анализа дефектов, имеющих сложную форму, это анализ с помощью кривой. В этом случае положение дефекта описывается с помощью набора полиномиальных сплайнов (Рисунок 62). Длина такого дефекта определяется суммарной длиной сплайнов.

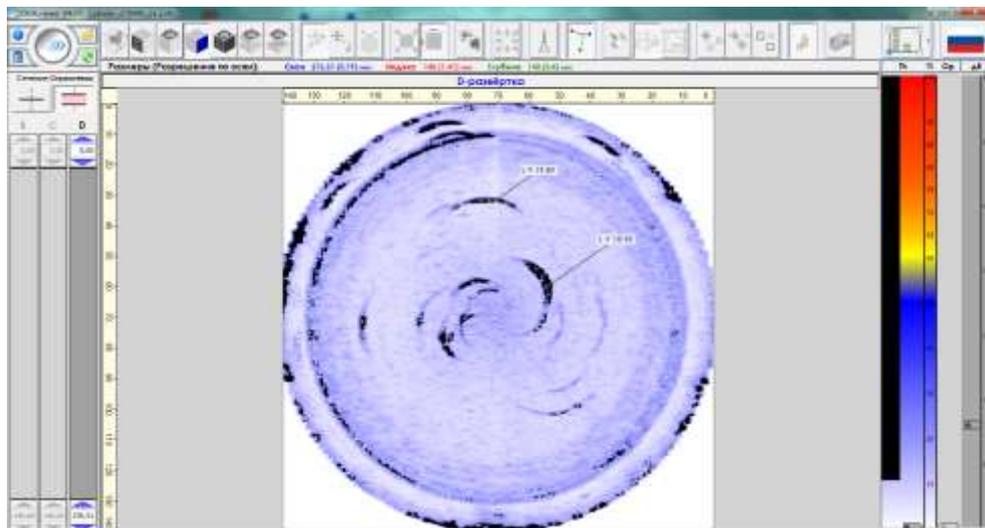


Рисунок 62 – Анализ дефекта с помощью кривой

Поскольку сплайны описываются коэффициентами, имеющими тот же смысл, что и входные данные, то в дальнейшем можно применять математические алгоритмы для расчета, используя эти коэффициенты.

В случае контроля качества больших объектов, получаемый объем данных может превышать ресурсы памяти компьютера. Если используемый компьютер не будет обладать достаточным объемом, то возможно использование сегментации. В таком случае объект может быть физически разделен на несколько секторов, или можно производить разбиение контролируемой области на сегменты по проекционному растру.

Для заданной геометрии контейнера инспектируемая область будет разбиваться на одинаковые сегменты, максимально приближенные к размерам, предложенным оператором (здесь оператор задает размер окна как « $x \times y$ », после чего программа предлагает « $x_1 \times y_1$ » такой, чтобы разбиение было без остатка). При этом по результатам измерений выполняется создание модифицированного массива в низком разрешении с последующей проекцией сжатых данных из предыдущего шага. Исходный массив в высоком разрешении разбивается на сегменты. Анализ выбранного сегмента выполняется по определенной проекции (в зависимости от способа анализа, может быть выбрана C-, B-, D- развертка). Данные для анализа предоставляются в максимальном разрешении.

Исходя из приведенного выше наиболее значимым результатом при проведении контроля является размер обнаруженной несплошности, ее тип и место расположения. Получаемые данные обладают всей необходимой информацией для дальнейшей оценки работоспособности контролируемого пенала для хранения ОЯТ.

Конечной целью проведения инспекции качества пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 является определение степени влияния обнаруженных несплошностей на возможность последующей эксплуатации объекта. Основная нагрузка, прикладываемая к объекту контроля, связана с необходимостью его размещения в гнездо хранения. Для этого пенал перемещается при помощи специализированного подъемного устройства, а основная нагрузка приходится на сварное соединение, герметизирующее крышку и корпус. В связи с этим, необходимо установить какое влияние оказывают конкретные несплошности на предельное значение допустимой нагрузки данного сварного соединения.

Значение предельно допустимой нагрузки напрямую связано с пределом прочности, в связи с чем в рамках работы был проведен анализ изменения предела прочности в случае появления дефекта в сварном соединении.

2.3 Оценка значения предельно допустимой нагрузки сварного соединения пенала для хранения ОЯТ

2.3.1 Напряжения в бездефектном шве

В стыковых швах концентрация напряжений возникает вследствие изменения сечения пластины в зоне соединений. Она может быть очень значительной при отсутствии полного провара корня шва. Чем меньше усиление швов и плавнее их сопряжение с основным металлом, тем меньше коэффициенты концентрации [83].

На основании аналитического обзора, посвященного оценке влияния допустимых несплошностей, диагностируемых ультразвуковым методом, на прочность сварного соединения, можно сделать вывод, что в рамках разрабатываемой методики допустимо учитывать влияние только следующих нетрещиноподобных дефектов: газовая полость или включение, пора, как одиночные, так и в виде цепочек или скоплений, и непровар.

Первым шагом для оценки влияния на уровень предельно допустимой нагрузки необходимо оценить нагрузку, которая прикладывается к бездефектному шву в случае отсутствия дефектов. Таким образом, полученное при обнаруженных дефектах предельно допустимое напряжение, которое может выдержать шов, будет сравниваться со значением напряжения деформации, которая будет возникать в сварном соединении при поднятии пенала за его крышку. Получаем условие сохранности шва при поднятии, исходя из соотношения между напряжениями $\sigma_{пред}$ и $\sigma_{нагруз}$.

$$\sigma_{пред} < \sigma_{нагруз} \quad (6)$$

Расчет прочности бездефектного шва крышки пенала сводится к расчету на прочность сварного стыкового шва. Практикой установлено, что при качественном выполнении сварки разрушение соединения стальных деталей происходит преимущественно в зоне термического влияния. Поэтому расчет прочности следует выполнять по размерам сечения детали в этой зоне.

Возможное снижение прочности деталей, связанное со сваркой (с невозможностью выполнить отжиг детали после сварки), учитывают при назначении допускаемых напряжений, а размеры расчетного сечения принимают по размерам детали. Основной расчет ведут по максимальным статическим нагрузкам. Такими нагрузками являются продольная сила F , поперечная сила Q и моменты: изгибающий M и крутящий T (Рисунок 63) [84].

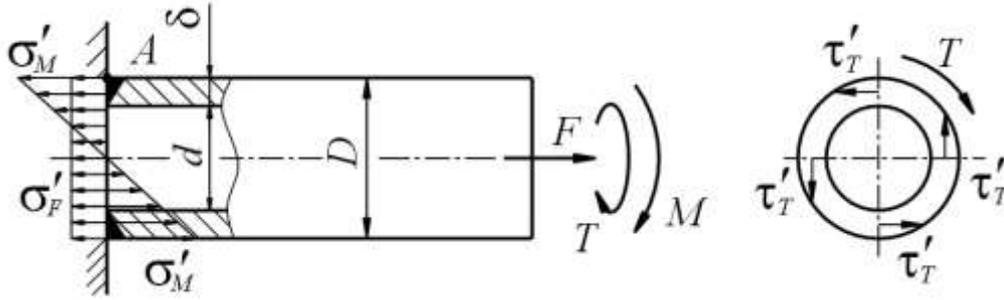


Рисунок 63 – Сварное соединение таврового типа с использованием стыкового шва

При действии продольной силы F расчет ведут по нормальному напряжению:

$$\sigma'_F = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)}. \quad (7)$$

При действии изгибающего момента M возникает нормальное напряжение, которое будет максимальным в наиболее нагруженной точке сварного шва:

$$\sigma'_M = \frac{M}{W} = \frac{32Md}{\pi(D^4 - d^4)}. \quad (8)$$

При действии поперечной нагрузки Q возникает касательное напряжение:

$$\tau'_Q = \frac{16Td}{\pi(D^4 - d^4)}. \quad (9)$$

При действии всех трех нагрузок используют выражения (7), (8) и (9), а рабочее нормальное напряжение определяют по энергетической теории прочности (четвертой):

$$\sigma'_{прIV} = \sqrt{(\sigma'_F + \sigma'_M)^2 + 3(\tau'_Q)^2}. \quad (10)$$

При равноускоренном поднятии пенала за крышку, на шов действует продольная растягивающая сила:

$$F = m(g + a), \quad (11)$$

где a – ускорение, с которым движется пенал.

На рисунке 64 приведена зависимость нормального напряжения, возникающего при воздействии продольной силы F . В свою очередь значения напряжения в бездефектном шве пенала относительно площади его сечения будет равно $\sigma = 4,1$ МПа. При этом интересующее нас значение рабочей нагрузки к сварному соединению при равноускоренному поднятию будет равно: $F(a = 0) = 4,36$ МН.

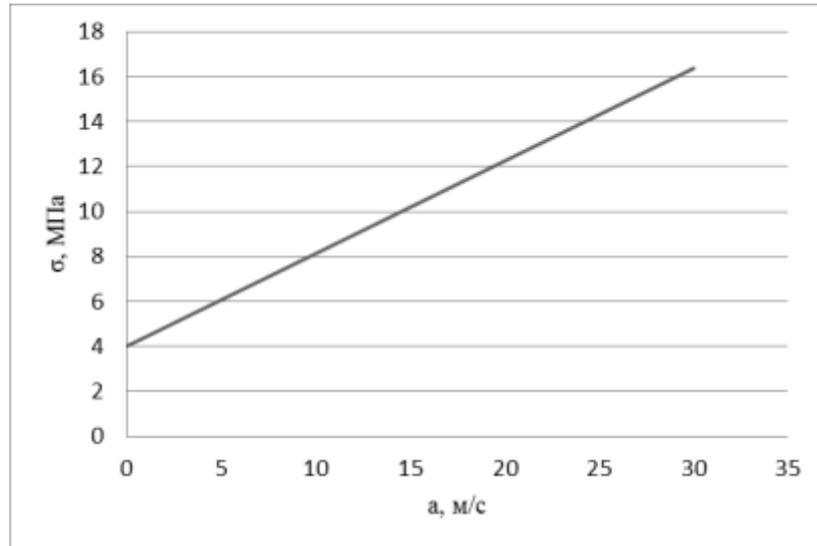


Рисунок 64 – Зависимость напряжения деформации от ускорения при поднятии пенала

2.3.2 Напряжения в сварном соединении при наличии дефектов

а) Напряжения в шве при наличии пор

Расчет напряжений, создаваемых нетрещиноподобным дефектом, может быть произведен в терминах критерия стабильной эксплуатации:

$$\sigma_{\text{раб}} \leq \sigma. \quad (12)$$

Допустимым напряжением σ является величина, ограничивающая верхний предел рабочих напряжений, которые возникают под действием заданных нагрузок:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ – предельное напряжение, вызывающее разрушение элемента или значительные остаточные деформации;

n – нормативный запас прочности.

Запас прочности нужен для обеспечения бесперебойности работы элементов конструкций при непредвиденных временных перегрузках, возможных ошибках в расчетах или вследствие изменений размеров элемента в процессе эксплуатации [85].

Общее выражение для предельного напряжения в рассматриваемом случае имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{пред}} = \begin{cases} \sigma_{\text{В}}^{(\text{ОМ})} & \text{при } \theta \leq \frac{\sigma_{\text{В}}^{(\text{МШ})}}{\sigma_{\text{В}}^{(\text{ОМ})}} - 1, \\ \sigma_{\text{Т}}^{(\text{МШ})} (1 - \theta) + (\sigma_{\text{В}}^{(\text{МШ})} - \sigma_{\text{Т}}^{(\text{МШ})}) (1 - \theta)(1 + 0,65\theta) & \text{при } \theta > \frac{\sigma_{\text{В}}^{(\text{МШ})}}{\sigma_{\text{В}}^{(\text{ОМ})}} - 1, \end{cases} \quad (14)$$

где $\theta = l/S$ – относительный размер дефекта, то есть размер дефекта l , отнесенный к толщине шва S .

Таким образом, по формуле (14) можно оценить величину предельно допустимого напряжения, которое можно приложить к шву, в котором присутствует одиночная пора размером θ .

На рисунке 65 представлена зависимость предельного напряжения от относительного размера дефекта. В рамках рассматриваемого случая относительные размеры дефекта, согласно установленным требованиям (Приложение Б), не превышают 0,1, что соответствует первому условию $\theta \leq \frac{645}{530} - l = 0,22$. Таким образом, согласно рисунку 65 предельное напряжение в пенале при максимально допустимых размерах дефекта остается постоянной величиной и равно пределу прочности основного металла (стали 12Х18Н10Т) $\sigma_e^{(ом)} = 530$ МПа. Тогда, согласно выражению (11) и с учетом того, что нормативный запас прочности для аустенитной стали $n = 3$ [83], получаем рабочее значение напряжения $\sigma = 177$ МПа.

При это в рамках работы было оценено, что максимально допустимый размер одиночной поры равный 0,4 м не снижает значения предела прочности, а значит и предельно допустимой нагрузки для рассматриваемого сварного соединения.

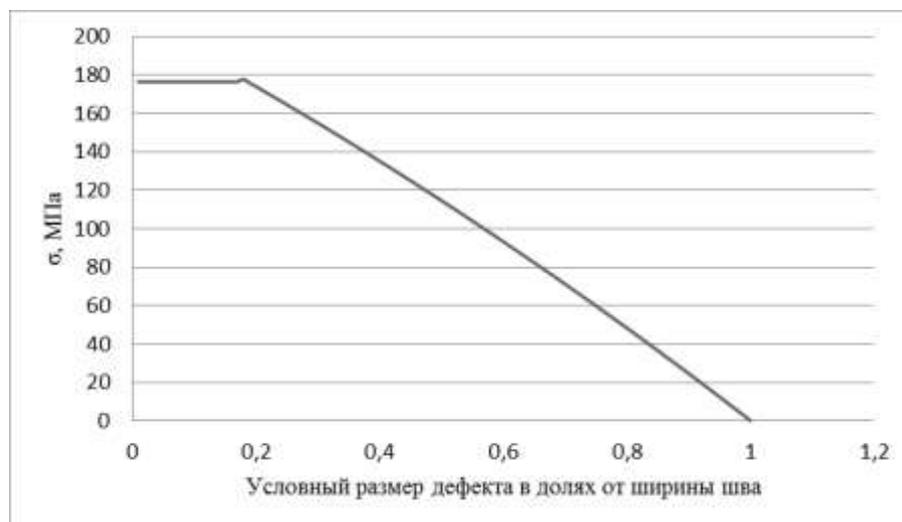


Рисунок 65 – Зависимость значения предельного напряжения от условного размера дефекта в долях от ширины шва

б) Напряжения в шве при наличии скопления включений

Для учета зависимости пространственного распределения дефектов на величину предельно допустимого напряжения сварного шва предлагается применять понятие эффективного радиуса поры $r^{\text{эф}}$. Тогда величина напряжения в случае, если поры расположены на расстоянии, менее трех диаметров наибольшей поры, может быть определена как $\sigma (r^{\text{эф}})$ [86].

В случае цепочки или скопления пор координаты эффективного радиуса эквивалентной поры могут быть определены аналогично координатам центра масс системы тел, где в качестве меры взаимодействия (массы) будут выступать диаметры d обнаруженных пор в скоплении.

Рассмотрим систему координат, в которой заданы исходные данные ультразвукового обследования. Для скопления пор эффективным центром будет точка с радиус-вектором:

$$r_{ijk}^l = \frac{\sum_{l=1}^N d^l r^l}{\sum_{l=1}^N d^l}, \quad (15)$$

где r – радиус-векторы к центрам пор;

N – количество пор в скоплении (Рисунок 66).

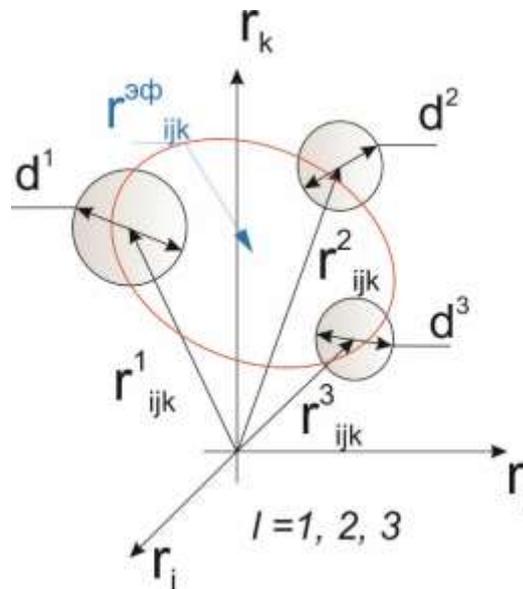


Рисунок 66 – Иллюстрация подхода оценки эффективного радиуса эквивалентной поры для скопления из 3 пор

Величину эффективного радиуса предлагается искать как произведение расстояния от центра масс до наиболее удаленной поры на нормировочный коэффициент, учитывающее диаметры пор в скоплении. Таким образом, рассматривая данный коэффициент как отношение объема сферы, охватывающей скопление к суммарному объему сферических несплошностей, получаем значение эффективного радиуса эквивалентной поры:

$$r^{\text{эф}} = \frac{2^N}{8} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{r_{\text{max}}^3} \cdot r_{\text{max}} = \frac{2^N}{8} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{r_{\text{max}}^2}. \quad (16)$$

Далее предельное напряжение материала с такой порой можно рассчитать в соответствии с выражением (11).

В рамках работы был выполнен расчет для максимальной площади, которую могут занимать как единичные поры, так их цепочки и скопления и было установлено, что при этом

величина предельно допустимой нагрузки для сварного соединения пенала для хранения ОЯТ снижается не более чем на 1 %.

в) Напряжения в шве при наличии непровара

Для учета вклада непроваров в снижение прочности сварных соединений предлагается использовать данные, полученные в работе [86].

На рисунке 67 представлена зависимость прочности сварного шва от глубины непровара в случае, когда шов нечувствителен к данному типу дефекта.

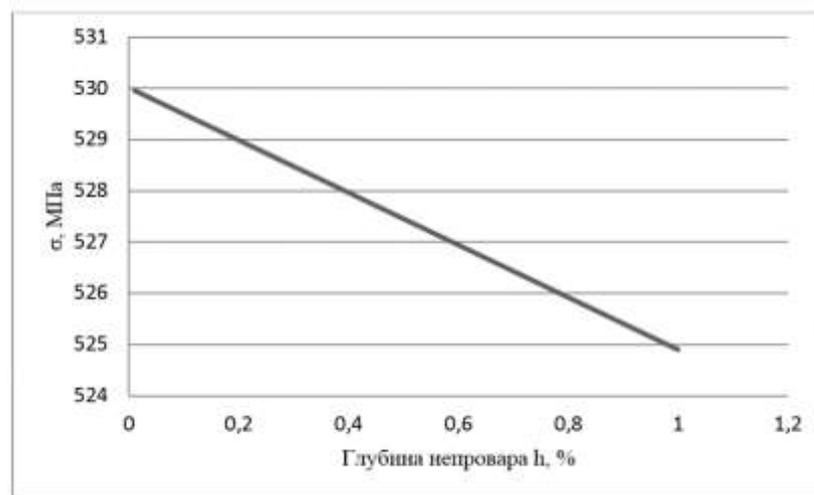


Рисунок 67 – Изменение прочности при увеличении глубины непровара в случае, когда шов нечувствителен к данному типу дефектов

По данному графику было определено, что непровар в корне шва допустимой высоты $h \leq 0,05S$ (Приложение Б), пролегающий вдоль всей плоскости соединения, снижает предел прочности сварного соединения на 20-30 МПа. Как было показано в случае с порой, предельно допустимое напряжение с учетом нормативного запаса прочности составляет 177 МПа. Таким образом, максимально возможное неполное проплавление снижает прочность сварного соединения незначительно [87].

2.4 Выводы к главе 2

В данной главе описана разработанная методика для контроля качества на основе применения методов ультразвуковой томографии, состоящая из нескольких основных частей.

Одной из них является разработанная и реализованная БД дефектов, содержащая 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 [88-91].

При оценке прочности инженерных конструкций на этапе эксплуатации не всегда возможно ограничиться использованием методов проектных расчетов, так как на технологическом этапе производства изделия крайне вероятно возникновение несплошностей, учет которых данные расчеты не предусматривают. Причинами возникновения дефектов металла шва могут быть различные факторы технологического, металлургического и организационного характера. В данной главе рассмотрены основные характеристики материала и особенности применяемого режима сварки, которые обуславливают образование определенного набора дефектов в ходе технологического процесса.

Основными типами дефектов, которые необходимо зафиксировать, являются газовые полости, включая поры; шлаковые включения; металлические включения; несплавления; непровары; трещины.

Определение конкретного типа несплошности, ее идентификация с целью определения размеров и местоположения производятся согласно разработанному способу обнаружения и распознавания дефектов объекта на основе индикаций ультразвуковой томографии, описание которого приведено в данной главе. По результатам контроля производится оценка допустимости обнаруженных несплошностей путем применения БД и принимается решение о том, являются ли они дефектом.

В главе так же представлена оценка степени влияния дефектов, обнаруживаемых посредством ультразвуковой томографии пеналов, на возникновение дополнительных напряжений в сварном соединении, которое отвечает за герметизацию между крышкой и корпусом, а также их влияния на предельно допустимую нагрузку. В ходе проведения данной оценки было установлено, что наличие максимально допустимых, согласно разработанной БД, несплошностей в различных конфигурациях незначительно влияет на предельно допустимые нагрузки соединения. Это позволяет сделать вывод о правомерности и надежности критериев, установленных созданной БД.

Еще одной важной частью предлагаемой методики является определение подходящих параметров метода и аппаратуры для проведения эффективного сканирования посредством ультразвуковой томографии [92-97]. Ее реализация достигается путем расчета и обоснования каждого из параметров, потенциально влияющих на результаты сканирования. В работе проведены все необходимые расчеты параметров метода и аппаратуры, которые приведены в следующей главе, так как они непосредственно повлияли на выбор аппаратуры и схемы сканирования при проведении эксперимента.

ГЛАВА 3 АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОЯТ

3.1 Расчет и обоснование параметров проведения ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов

3.1.1. Определение параметров аппаратуры

Одним из основных этапов любой методики УЗК является осуществление предварительной подготовки к проведению инспекции, которая значительно влияет на точность получаемых результатов. Это заключается в выборе и обосновании параметров акустического тракта и метода проведения сканирования.

Под параметрами акустического тракта понимается выбор преобразователя с определенными характеристиками, обоснование необходимости наличия призмы и ее параметров, а также расчет параметров акустического поля, формируемого выбранной аппаратурой. Под параметрами метода сканирования понимается его тип, особенности пути сканирования, определение чувствительности и разрешающей способности.

Параметры выбираемого акустического тракта зависят от геометрических и структурных особенностей ОК. Предлагаемая методика рассчитана на контроль качества сварных соединений пенала для хранения ОЯТ, характеристики которого отражены в таблице 1. В качестве метода сканирования был выбран целевой метод, позволяющий существенно снизить уровень поглощения полезных сигналов при прохождении через связующую среду, а также позволяющий проведение инспекций крупногабаритных изделий. Более подробное сравнение существующих методов УЗК в зависимости от способа обеспечения акустического контакта приведено в разделе 1.4. В качестве метода сканирования был выбран метод электронного сканирования для осуществления возможности построения трехмерных изображений (Раздел 1.6). Для этих целей необходимо применение ФАР линейного типа, так как при использовании матричного преобразователя происходит накопление избыточного сигнала сложного для интерпретации.

Выбор параметров акустического тракта обуславливается способностью обеспечения необходимых характеристик акустического поля в заданном объекте.

В общем случае, свойства поля зависят от следующих факторов:

- конструкция преобразователя;
- тип преобразователя;
- размер преобразователя;
- свойства упругой среды, в которой создается поле;
- рабочая частота колебаний.

В работе произведен расчет параметров, которыми должен обладать применяемый преобразователь.

Частота ультразвукового преобразователя должна быть такой, чтобы длина волны была меньше или равна размерам дефектов, которые требуется обнаружить. Таким образом, ультразвуковые волны будут претерпевать отражение при наличии дефектов в сварном соединении. Для этого в зависимости от размера минимального дефекта, который необходимо обнаружить, частота должна удовлетворять следующему условию:

$$f \geq \frac{v}{d}, \quad (17)$$

где v – скорость ультразвуковой волны в материале контроля;

d – размер минимального обнаруживаемого дефекта.

Так как исследуемый объект имеет небольшую толщину, необходимо принимать во внимание, что в таких соединениях обычно требуется обнаруживать дефекты малого диаметра. В связи с этим лучевая разрешающая способность должна быть достаточно высокой, не менее $H/4$, где H толщина объекта. Учитывая, что лучевая способность начинает уменьшаться при значениях меньше 1,5 длины волны [98], то получаем условие:

$$f \geq \frac{6v}{H}. \quad (18)$$

Таким образом вычислено, что частота должна превышать 4,8 МГц.

Исходя из практик контроля и доступного аппаратного парка, выбран ультразвуковой датчик фирмы Doppler с рабочей частотой 7,5 МГц (Рисунок 68).

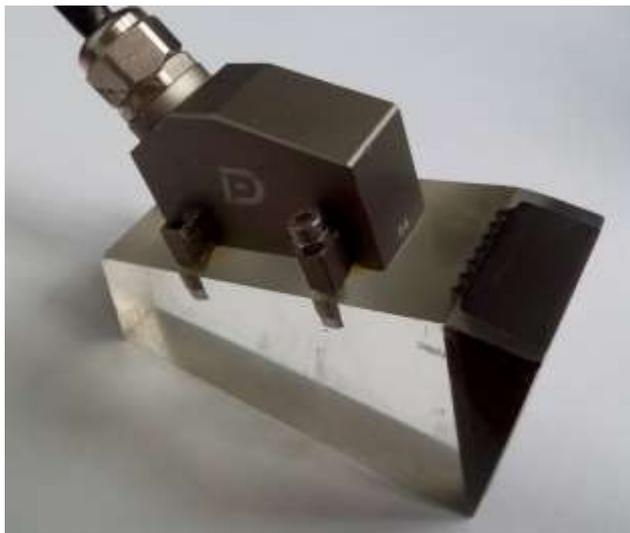


Рисунок 68 – Ультразвуковой датчик фирмы Doppler

При этом был выбран поперечный тип ультразвуковых волн. Они наиболее всего подходят для контроля сварных конструкций, так как имеют меньшую длину волны и, соответственно,

лучшую отражающую способность от границы с дефектами небольших размеров. Так как ОК представляет собой тонкостенное изделие (2-10 мм) с мелкозернистой структурой, то небольшая скорость прохождения волны в 3,2 мм/мкс является подходящей для контроля.

Кроме того, вероятность обнаружения дефектов будет зависеть от угла ввода. Для тонких сварных швов необходим преобразователь с большим углом ввода, который позволяет обнаруживать дефекты в нижней части сварного шва [98].

Сварные соединения имеют валик усиления, который в большинстве случаев не удаляется. В связи с этим требуется наличие наклонного преобразователя для ввода акустических волн под углом при размещении датчика в околошовной зоне. При этом корневая часть шва должна контролироваться прямым лучом.

Угол наклона призмы и преобразователя β был рассчитан согласно условию:

$$m + g + H/2 < 2Htg\alpha/3, \text{ где} \quad (19)$$

$$m = \alpha/\cos\beta. \quad (20)$$

В данном случае m соответствует стреле преобразователя, α – соответствующий угол ввода. Путем подстановки получаем:

$$\alpha/\cos\beta + 1 + H/2 < 2Htg\alpha/3. \quad (21)$$

Также важным является выполнение условия, чтобы в ОК не возбуждалась поверхностная волна, так как она приведет к возникновению ложных сигналов от валика усиления. Это можно обеспечить благодаря правильному выбору угла ввода:

$$\beta s = \arcsin\left(\frac{c_{np}}{c_s}\right), \quad (22)$$

где c_s – скорость распространения поверхностной волны.

Согласно данному условию, угол ввода должен быть меньше, чем угол возникновения поверхностных волн. Но в то же время поверхностные волны могут возникать от боковых лепестков акустического поля. Согласно теории акустического поля [98], в призме будут образовываться расходящиеся лучи, а затем преломляться на границе с изделием. Поэтому нужно учесть угол раскрытия пучка в призме. Для прямоугольной пластины связь между углом и размером элемента можно выразить как:

$$\beta + \arcsin\left(0,38 \frac{c_{np}}{a_f}\right) \leq \arcsin\left(\frac{c_{np}}{c_s}\right). \quad (23)$$

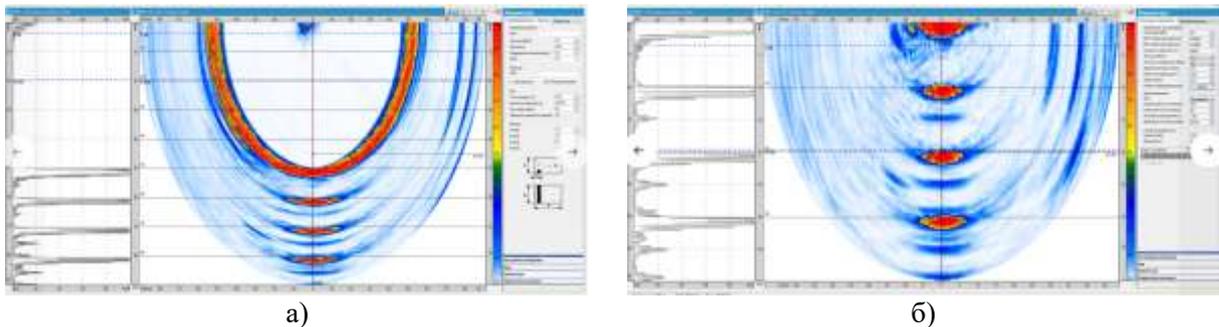
Учитывая, что для плексигласа $c_{np} = 2,7$ мм/мкс, для стали $c_s = 3$ мм/мкс. Для сварного шва толщиной в 4 мм и с величиной элемента $2a = 5$ мм, по формуле:

$$\beta = \arcsin(c_{np}/c_s), \quad (24)$$

получаем $\beta = 46$ ($\alpha = 60$).

Угол α является углом наклона акустической оси, который задается в зависимости от структуры и геометрии ОК. В работе [98] приведены данные по контролю качества токоственных сварных соединений из аустенитной стали, что обусловило выбор $\alpha = 60^\circ$.

Путь, который проходит ультразвуковая волна в используемой призме определяется производителем преобразователя, при этом он может быть установлен экспериментально. Определение данной характеристики необходимо для наиболее точного отображения и анализа получаемых результатов. На рисунках представлено типичное представление результатов контроля с учетом и без учета задержки волны в призме соответственно (Рисунок 69).



а) совместно с отображением задержки в призме; б) в случае, когда задержка в призме учтена в конечном представлении ультразвуковых сигналов в объекте

Рисунок 69 – Представление распространения ультразвукового поля в ОК

Рассчитанные параметры для акустического преобразователя приведены в таблице 3.

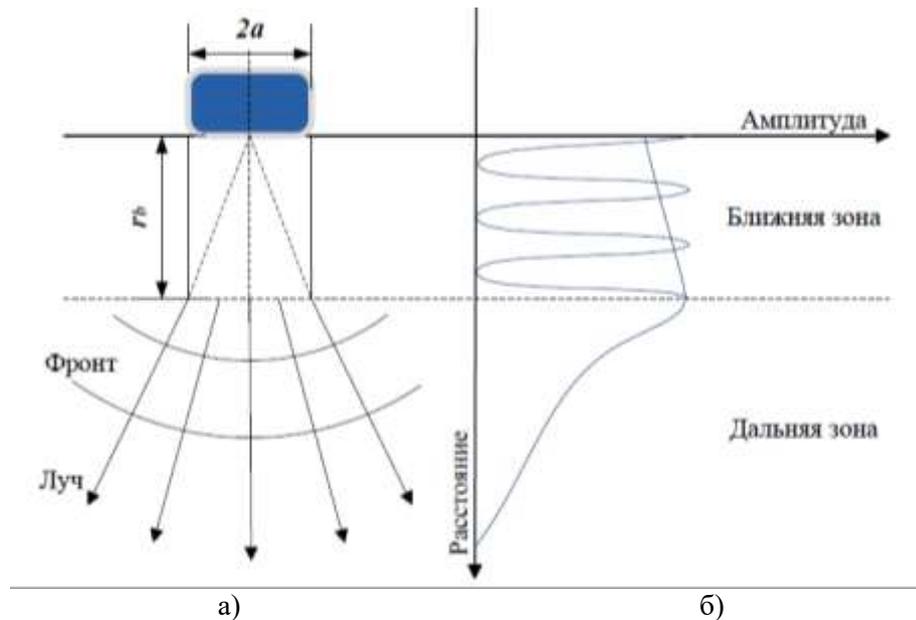
Таблица 3 – Параметры требуемого акустического преобразователя

| Параметр | Значение |
|---------------------------------|---------------------|
| Частота, МГц | 7,5 |
| Время волны в ПЭП | 16 |
| Размеры элемента, мм | 2,5 |
| Количество элементов | 8 |
| Угол призмы, β° | 46 |
| Угол ввода, α° | 60 |
| Длина волны, мм | 0,4 |
| Тип волны | Поперечные |
| Скорость волны в ОК, м/с | 3200 |
| Скорость волны в призме, мм/мкс | $3,6 \cdot 10^{-5}$ |

3.1.2. Определение параметров сканирования

Для того чтобы определить параметры метода сканирования необходимо изучить процесс распределения ультразвуковых волн. При излучении ПЭП акустических волн, они

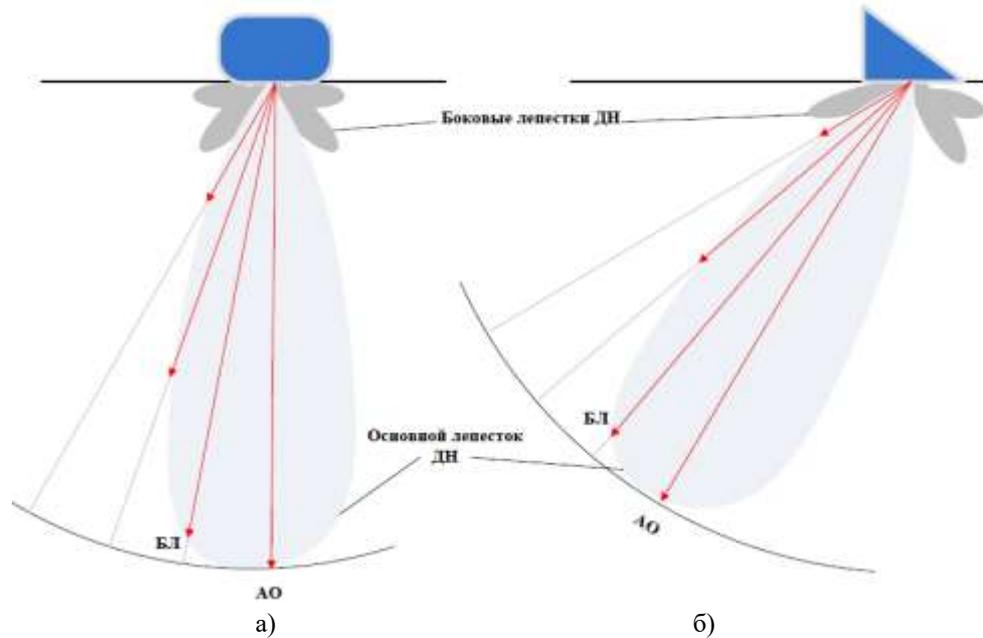
распределяются неравномерно в пространстве (Рисунок 70). Они формируют акустическое поле, параметры которого будут изменяться в зависимости от расстояния до преобразователя. Для описания углового распределения энергии волны вводят понятие акустического поля. Акустические поля вблизи ПЭП и на удалении от него существенно отличаются. При этом обнаружение дефектов должно осуществляться в дальней зоне, так как там поле распространяется равномерно сферическим фронтом.



а) акустическое поле ПЭП в ближней и дальней зонах; б) зависимость амплитуды колебаний от расстояния в ближней и дальней зонах

Рисунок 70 – Ближняя и дальняя зона ПЭП

Вторая группа параметров, которые будут учитывать особенности распространения акустического поля, связаны с ДН и ее основными характеристиками. ДН описывает угловое распределение амплитуды волн в дальней зоне акустического поля. Она имеет основной лепесток, где концентрируется 85 % всей энергии излучения, технология контроля должна разрабатываться таким образом, чтобы дефекты были обнаружены данным лепестком (Рисунок 71).



а) в случае прямого преобразователя; б) в случае наклонного преобразователя

Рисунок 71 – Распространение акустической энергии (БЛ – боковой лепесток, АО – акустическая ось)

ДН характеризуют по двум параметрам: углу наклона акустической оси и углу раскрытия ДН.

Угол раскрытия ДН равен:

$$\varphi = \arcsin(n \cdot c / f \cdot a), \quad (25)$$

где n – коэффициент учитывающий форму пьезопластины (0,61 – для круглых; 0,5 – для прямоугольных);

c – скорость волны в среде;

f – частота;

a – радиус пьезопластины.

Граница ближней зоны ДН равна:

$$N = a^2 / \lambda, \quad (26)$$

где λ – длина волны.

Угол ввода (α_e) – это угол между нормалью к поверхности ввода и линией, соединяющей центр ненаправленного отражателя с точкой выхода луча в положении ПЭП с максимальной амплитудой.

Угол ввода и угол наклона акустической оси отличаются по своим значениям, причем угол ввода всегда меньше. Это объясняется тем, что в расходящемся пучке лучей, луч с меньшим углом, чем у акустической оси проходит меньший путь, его сигнал меньше ослабляется и именно в этом положении ПЭП амплитуда сигнала максимальна. Чем больше глубина залегания дефекта

и выше коэффициент затухания в материале, тем сильнее уменьшается угол ввода относительно угла наклона акустической оси.

Рассчитанные параметры ДН представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры ДН

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Угол раскрытия в призме, φ_n ° | 4 |
| Угол отклонения оси, α ° | 60 |
| Угол раскрытия, φ ° | 4,5 |
| Ширина ДН, мм | 1,2 |
| Граница ближней зоны ДН, мм | 3,9 |

Графическое представление ДН представлено на рисунке 72.

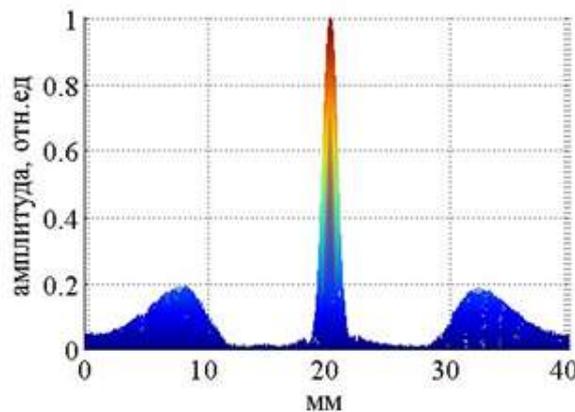


Рисунок 72 – Диаграмма направленности

Следующая группа параметров, которая была рассчитана, предназначена для определения траектории и пути сканирования, то есть схемы проведения контроля.

Она является основой любой методики. Ее эффективность в каждом конкретном случае будет зависеть от размеров сканируемой области (поперечного сечения сварного соединения), вероятности обнаружения наиболее потенциально опасных дефектов (трещина, непровар, включения), достоверности получаемых результатов.

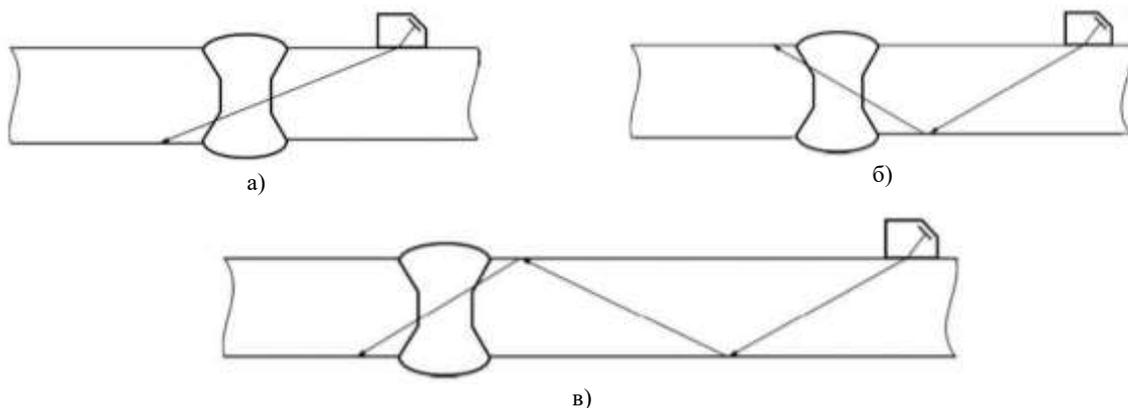
Вероятность обнаружения будет обусловлена подходящим выбором траектории и шагов сканирования.

Как было определено ранее, контроль стыковых сварных соединений осуществляется наклонным преобразователем с поперечной волной. При этом преобразователь перемещается по ровной поверхности основного металла. Использование наклонных преобразователей обеспечивает возможность обнаружения дефектов прямыми и отраженными лучами в зависимости от их расположения по высоте шва. Кроме того, также допускается обнаружение

дефектов при многократном отражении согласно ГОСТ 14782-86 [99]. Это отражается на выборе параметров сканирования.

Для проверки всего объема по всей высоте соединения, необходимо перемещать преобразователь по двум направлениям относительно сварного шва. Таким образом, в качестве схемы движения ПЭП для предлагаемой методики был выбран «меандр».

Существуют специальные нормативные документы, предполагающие перемещение преобразователя в поперечном и продольном направлении определенным образом. Согласно ГОСТ Р 55724-2013 [100] при прозвучивании стыкового сварного соединения эхо-импульсными методом допускается выполнение схем сканирования прямым, однократно и двукратно-отраженными лучами. Но тем не менее в зависимости от размеров ОК, в частности от его толщины, необходимо производить расчет шага сканирования (перемещения преобразователя) по обеим осям, для обеспечения полного прозвучивания шва по всей глубине. На рисунке 73 отображены различные схемы контроля сварного соединения [100].



а) схема прозвучивания прямым лучом; б) схема прозвучивания стыкового сварного соединения однократно-отраженным лучом; в) схема прозвучивания стыкового сварного соединения двукратно-отраженным лучом

Рисунок 73 – Применяемые схемы контроля сварного соединения

В соответствие с существующими требованиями и геометрическими параметрами пенала для хранения ОЯТ был произведен геометрический расчет шага сканирования с учетом угла раскрытия пучка ультразвукового поля. Выявлено, что для обеспечения прозвучивания шва по всей глубине необходимо пять точек проведения сканирования с шагом $S_x = 1,7$ мм, ширина валика усиления равна 17 мм. Разработанная схема сканирования представлена на рисунке 74, а рассчитанные значения приведены в таблице 5.

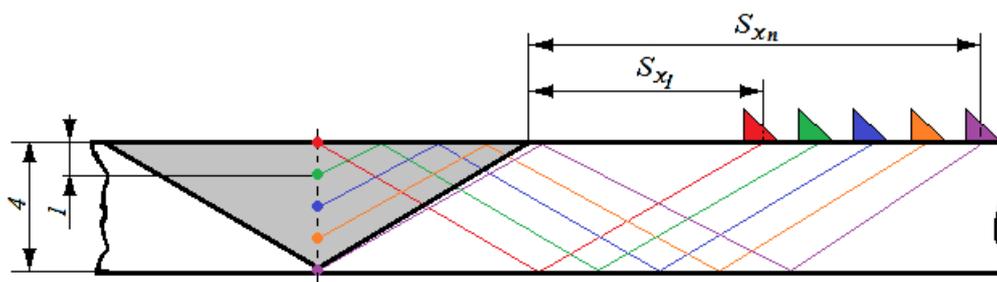


Рисунок 74 – Разработанная схема контроля сварного соединения пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000

Таблица 5 – Параметры сканирования

| № образца | 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 | 3,4-4,0 | 14,1 |

В дополнение к геометрическому расчету, был также проведен расчет согласно [98], учитывающий угол раскрытия ДН, размер элемента линейного преобразователя (27) и угол наклона акустической оси при контроле (28).

$$Sn = X_1(1 + 2 \cdot tg\theta / \sin 2\alpha)^{n-1}. \quad (27)$$

$$S_x = 1 + 2 \cdot \frac{tg\theta}{\sin 2\alpha} = 1 + \frac{2 \cdot 0,32}{\sin 120} = 1,74 \text{ мм}. \quad (28)$$

При этом X_1 соответствует тому, что ультразвуковой преобразователь должен размещаться в околосшовной 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 ФАР с 8 элементами и длиной одного элемента в 2,5 мм. Полная схема сканирования по типу «меандр» представлена на рисунке 75.

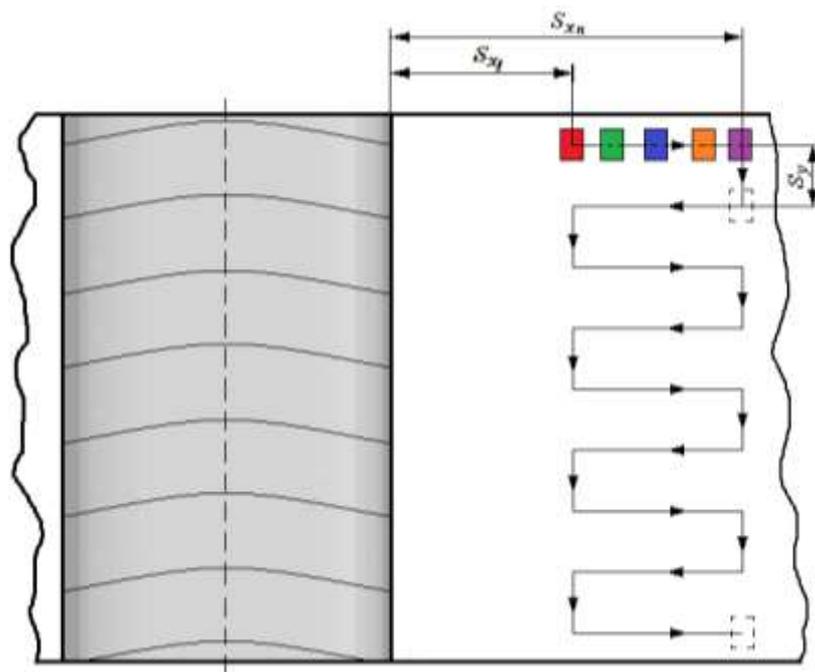


Рисунок 75 – Сканирование сварного соединения ОК по траектории «меандр»

Следующая группа параметров, величину которых необходимо определить, непосредственно оказывает влияние на достоверности получаемых результатов инспекций. К ней относятся чувствительность и разрешающая способность методики.

Чем выше значение максимальной чувствительности, тем выше амплитуда полезного сигнала от заданного размера дефекта, который необходимо обнаружить. Чувствительность является параметром аппаратуры и параметром метода, в связи с чем ее определение происходит по эквивалентным отражателям калибровочных образцов. Предельная чувствительность – это минимальный размер дефекта, который возможно обнаружить при помощи предлагаемой методики и используемого оборудования. Наименьший размер дефекта, который должен быть обнаружен при контроле сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ, составляет 0,4 мм. В ходе подготовки эксперимента изготовлены калибровочные образцы с эквивалентными отражателями данного диаметра, располагающиеся на различных глубинах. На рисунке 76 изображен калибровочный образец, имеющий три плоскодонных отверстия на глубине 15, 10 и 5 мм соответственно с расстоянием 0,4 мм между отражателями.

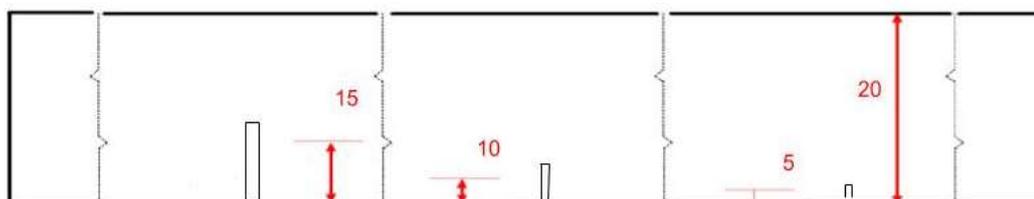


Рисунок 76 – Калибровочный образец

Таким образом, при контроле данного образца определялась эквивалентная чувствительность и разрешающая способность разработанной методики (Рисунок 77).

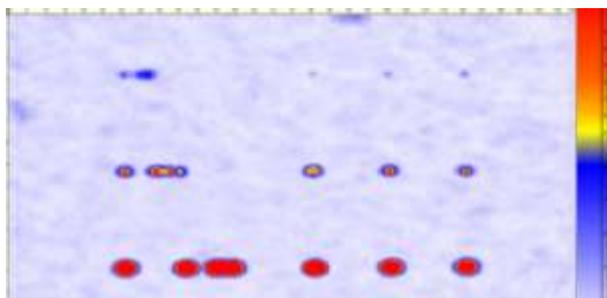
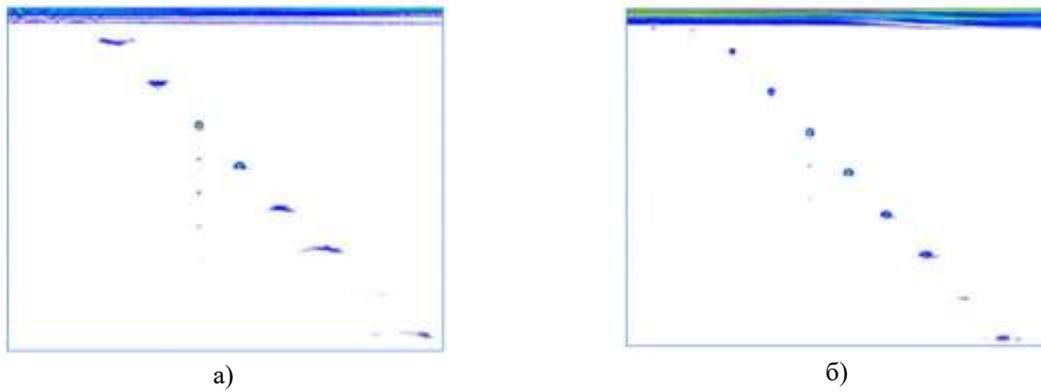


Рисунок 77 – Результаты сканирования калибровочного образца с плоскодонными отражателями с применением разработанной методики

Под разрешающей способностью понимается возможность различить два одинаковых отражателя на минимальном расстоянии. Данный параметр связан с возможностями фокусировки. При использовании ФАР имеется возможность вместо обычной применить динамическую фокусировку. Суть методики заключается в следующем. В режиме излучения поле фокусируется либо на максимальную глубину зоны контроля, либо формируется «распределённый» фокус. В режиме приема производится цифровая фокусировка на ряд глубин вдоль всей зоны контроля. Результатом такой обработки является улучшение соотношения сигнал/шум и улучшение разрешающей способности по всей зоне контроля. Иллюстрацией к этому может служить рисунок 78.

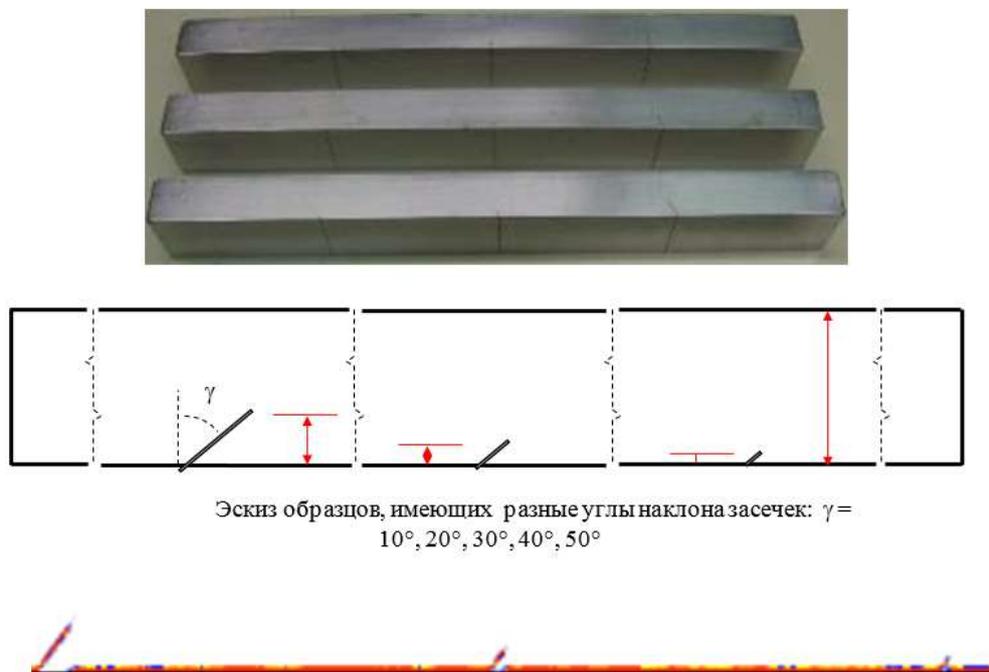


а) фокусировка выключена; б) фокусировка включена

Рисунок 78 – Влияние динамической фокусировки на результаты контроля

Кроме того, синтетическая фокусировка в ближнем поле ультразвукового преобразователя по принципу SAFT увеличивает чувствительность и разрешающую способность.

Разрешающая способность была также оценена при помощи калибровочных образцов с засечками, расположенными на различной глубине (10, 4, 2 мм), и под различными углами наклона γ , так как они позволяют определить возможность обнаружения дефектов типа трещина. Результаты представлены на рисунке 79.



Эскиз образцов, имеющих разные углы наклона засечек: $\gamma = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$

Рисунок 79 – Результаты сканирования калибровочного образца с засечками применением разработанной методики

Искусственные дефекты, как в случае обнаружения плоскодонных отверстий, так и наклонных засечек, были обнаружены с высокой точностью. Таким образом, проведенная оценка чувствительности и разрешающей способности показала, что разработанная методика и предлагаемая установка для проведения контроля позволяют обнаружить минимальный допустимый дефект сварного соединения пенала для хранения ОЯТ с диаметром в 0,4 мм, и разрешающей способностью равной 0,4 мм.

3.2 Описание аппаратуры измерительного тракта

Апробация предложенной в главе 2 методики контроля производится при помощи серии экспериментов при помощи оборудования, позволяющего производить УЗК при помощи ФАР и специализированного ПО, реализующего последующую обработку данных методом цифровой фокусировки DFA.

Эксперимент осуществлялся на контрольных образцах, предоставленных ГХК. Данные образцы являются частями пенала для хранения ОЯТ, они выполнены из стали марки 12Х18Н10Т и имеют сварные соединения, полученные соответствующим режимом аргонно-дуговой сварки, рассмотренном в разделе 2.1.2. Это подтверждает достоверность получаемых результатов и возможность их дальнейшего применения для проведения контроля на производственных площадях для реального пенала, подробнее используемые образцы описаны далее в разделе 4.1.

Аппаратное обеспечение лабораторной установки состоит из следующих модулей (Рисунок 80): измерительного и акустического трактов, манипулятора и блока управления манипулятором, а также блока определения координат.

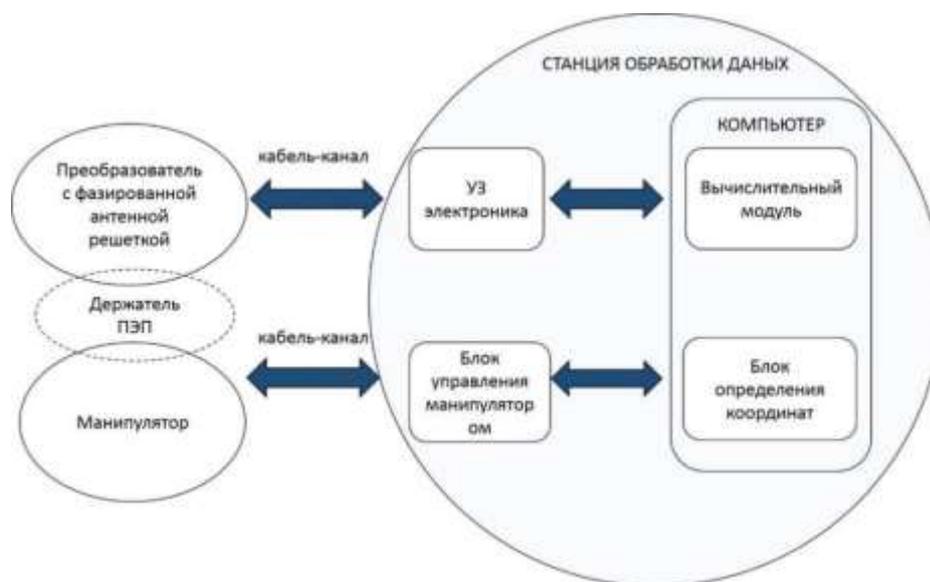


Рисунок 80 – Структурная схема лабораторной установки для УЗК сварных швов

Измерения проводятся при помощи установки УЗК, включающей в себя блок электроники OPTUS. Она является разработкой компании I-Deal Technologies GmbH (Германия). Данный блок позволяет реализацию измерений как в одноканальном режиме традиционным эхо-методом, так и при помощи ФАР, при этом имеется возможность подключения 128 каналов. Это обеспечивает достаточность набора данных для реализации томографической реконструкции. Блок OPTUS имеет оптический канал для передачи данных со скоростью 2 Гбит/с, что крайне важно для оптимальной скорости контроля крупногабаритных объектов при помощи ФАР. Данная установка соответствует требованиям ГОСТ 26266-90 [101] и EN-12668-1 [102].

Объект измерений сканируется при помощи трёх-осевого манипулятора. Данные записываются с учётом положения датчика, координаты которого отслеживаются с помощью блока определения координат. Обеспечивается пространственное 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.

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.

Лабораторная установка контроля представлена на рисунке 81.

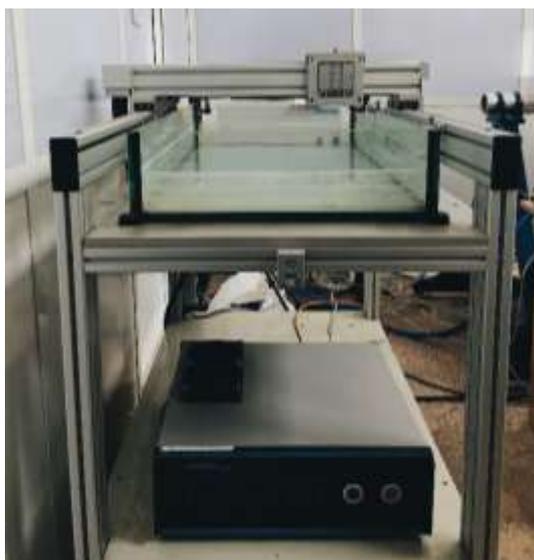


Рисунок 81 – Лабораторная установка для УЗК по методу DFA для контактного и бесконтактного контроля с трёх-осевым манипулятором

3.3 ПО для получения и реконструкции результатов контроля по методу DFA

ПО для ультразвуковой лабораторной установки содержит модули управления отдельными элементами системы в ручном и автоматическом режиме. Они принимают на себя контроль как над всем процессом проведения измерений, так и над параметрами системных компонентов и над управлением данными. Приём данных по методу антенных решёток с цифровой фокусировкой происходит таким образом, что полученная информация со всех каналов обрабатывается в реальном масштабе времени. При этом достигается реконструкция двумерных и трёхмерных изображений в реальном времени. Сохранённые результаты контроля по окончании расчётов формируются в файлы и предоставляются оператору. Взаимодействие модулей ПО между собой изображено на рисунке 82.

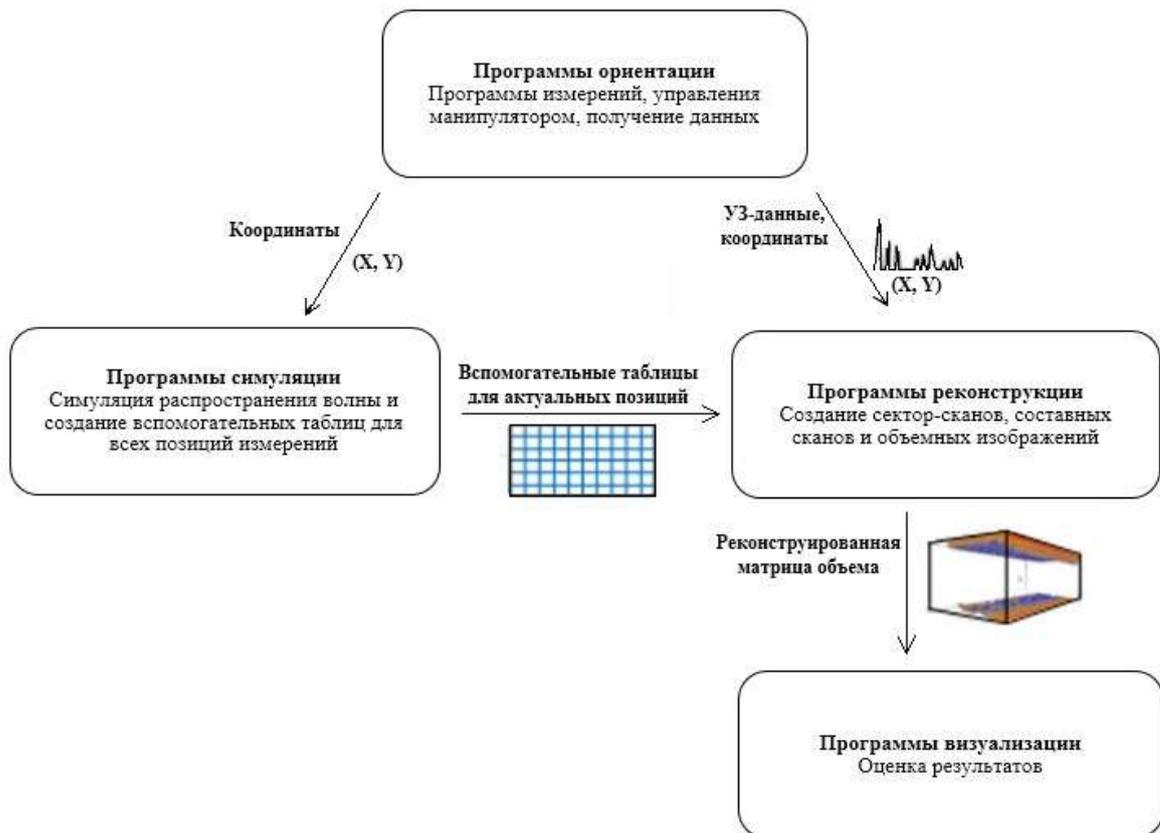


Рисунок 82 – Взаимодействие модулей ПО

Пример отображения результатов контроля при помощи используемого ПО в реальном времени приведен на рисунке (Рисунок 83).

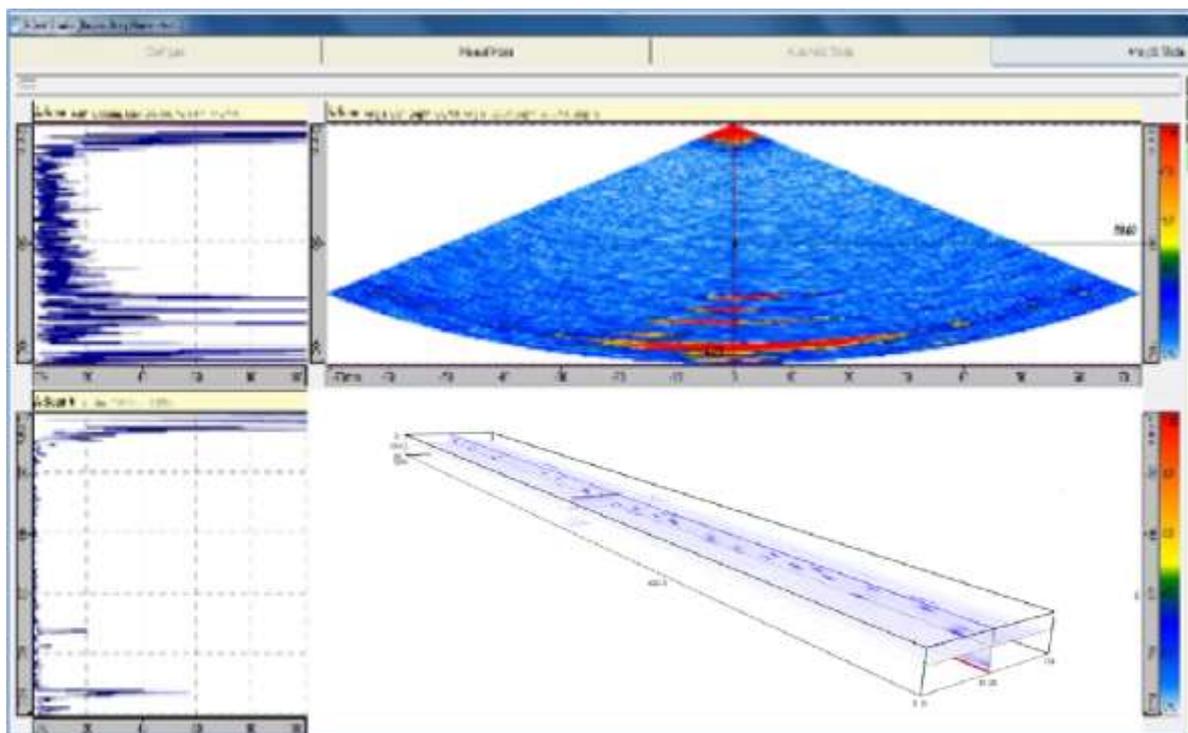


Рисунок 83 – Трехмерная визуализация результатов ультразвуковых-исследований с помощью метода DFA

3.4 Выводы к главе 3

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

Для апробации методики была выбрана автоматизированная лабораторная сканирующая система ультразвуковой томографии, состоящая из нескольких основных модулей. В нее входят такие модули, как измерительный и акустический тракт, манипулятор, блок управления манипулятором, а также блок определения координат.

Третья глава описывает 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 равным 60° , 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.

Важную функцию выполняет ПО, которое предоставляет взаимосвязь между аппаратными модулями измерительной системы. Оно позволяет получать, хранить и просматривать информацию об обнаруженных дефектах. Данное ПО обладает возможностью реализации УЗК 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 главе описан алгоритм взаимодействия основных модулей ПО.

ГЛАВА 4 ПРОВЕДЕНИЕ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ПЕНАЛА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОЯТ

4.1 Результаты ультразвуковой томографии сварных соединений

Описание ОК приведено подробно в разделе 1.2. Основными частями пенала являются крышка и корпус, которые соединяются при помощи герметичного сварного соединения. Проведение неразрушающего контроля главным образом нацелено на определение технического состояния именно данного сварного соединения. При обнаружении несплошностей необходимо удостовериться в том, насколько снижается значение предельно допустимой нагрузки для сварного шва в текущем состоянии, чтобы принять решение о дальнейшей эксплуатации изделия. В работе также проведена оценка степени влияния максимально допустимых дефектов каждого типа и конфигурации с целью обоснования надежности разработанной методики.

Экспериментальные образцы, представленные ГХК, представляют собой элементы каждой из основных частей пенала: корпуса, обечайки и кольца. В данном случае корпус представляет собой элемент, соответствующий сварному соединению между корпусом реального пенала и привариваемой к нему крышкой. Образцы, являющиеся частями обечайки, представляют реализацию продольных сварных соединений корпуса реального пенала. А под кольцом подразумевается необработанная заготовка, необходимая для дальнейшего изготовления корпуса реального пенала с продольным сварным соединением. Таким образом, предоставленные образцы в совокупности представляют все возможные варианты сварных соединений, которые используются при производстве пеналов для сухого хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000.

Характеристика для каждого соответствующего типа образцов приведена ниже. Все они были изготовлены из того же материала, что и реальный пенал для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 (аустенитная сталь 12Х18Н10Т), а также к ним применялись режимы аргонодуговой сварки, соответствующие реальным технологическим режимам.

Образцы, представляющие собой элемент корпуса пенала для сухого хранения ОЯТ представлены на рисунке 84.



Рисунок 84 – Внешний вид образца корпуса пенала

Они имеют следующие геометрические размеры, приведенные в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика экспериментальных образцов корпуса пенала

| Параметр | Значение |
|----------------------------|----------|
| Длина, мм | 200,0 |
| Ширина, мм | 200,0 |
| Толщина стенки, мм | 4,0 |
| Высота корня шва, мм | 1,5 |
| Высота валика усиления, мм | 1,5 |

Образцы, представляющие собой элемент обечайки пенала для хранения ОЯТ, представлены на рисунке 85.



Рисунок 85 – Внешний вид образца обечайки пенала

Данный тип образцов имеет геометрические размеры, приведенные в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристика экспериментальных образцов обечайки пенала

| Параметр | Значение |
|----------------------------|----------|
| Длина, мм | 200,0 |
| Ширина, мм | 201,0 |
| Толщина стенки, мм | 4,0 |
| Высота корня шва, мм | 1,7 |
| Высота валика усиления, мм | 1,7 |

Также были предоставлены образцы, представляющие собой элемент обечайки пенала для хранения ОЯТ, имеющие отличающиеся характеристики, обозначенные в таблице 8. Внешний вид данных образцов приведен на рисунке 86.

Таблица 8 – Характеристика экспериментальных образцов обечайки пенала второго типа

| Параметр | Значение |
|----------------------------|----------|
| Длина, мм | 200,0 |
| Ширина, мм | 201,0 |
| Толщина стенки, мм | 4,0 |
| Высота корня шва, мм | 1,4 |
| Высота валика усиления, мм | 1,0 |



Рисунок 86 – Внешний вид образца второго типа обечайки пенала

Образцы, представляющие собой элемент кольца пенала для сухого хранения ОЯТ, имеют характеристики, отраженные в таблице 9.

Таблица 9 – Характеристика экспериментальных образцов кольца пенала

| Параметр | Значение |
|------------------------------------|----------|
| Длина, мм | 387,0 |
| Ширина, мм | 189,0 |
| Толщина стенки после обработки, мм | 4,0 |
| Высота корня шва, мм | 1,0 |
| Высота валика усиления, мм | 0,5 |

Внешний вид образцов представлен на рисунке 87.



Рисунок 87 – Внешний вид образца кольца пенала

Как уже было указано ранее, результаты эксперимента предоставляются в нескольких видах, как в виде обычных С- и В-разверток, так и в виде трехмерной реконструкции. Для наилучшей оценки результатов в данной работе приводятся изображения разверток типа С.

Пример сканирования образца, являющегося частью обечайки на лабораторной установке, отражающий процедуру проведения эксперимента, приведен на рисунке 88.

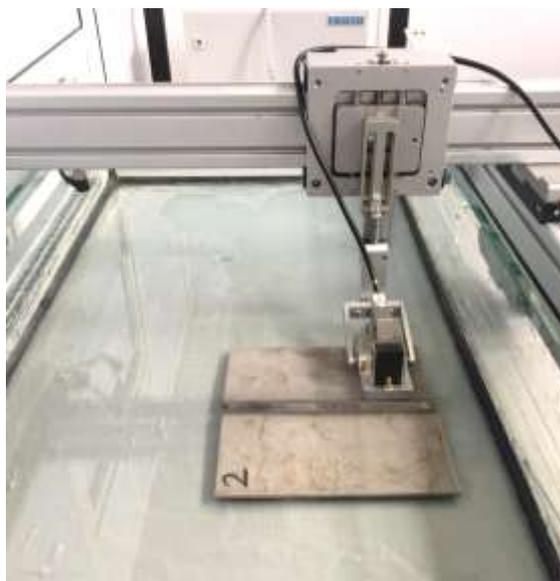


Рисунок 88 – Сканирование экспериментального образца

В качестве референтного метода анализа выбран РК, как наиболее точный. Результаты проведения РК на экспериментальных образцах были предоставлены ГХК. Рассмотрим типичные результаты, полученные при измерениях, и сопоставим их с результатами радиографии.

Полученные результаты контроля позволили обнаружить наличие дефектов типа непровар и включение в различных образцах.

По результатам УЗК образца, являющегося элементом обечайки пенала, был обнаружен дефект, являющийся непроваром сварного соединения. На рисунке 89 представлено сопоставление полученных результатов контроля (С-скан) с результатами радиографии. На рисунке 90 представлена томография найденного дефекта.

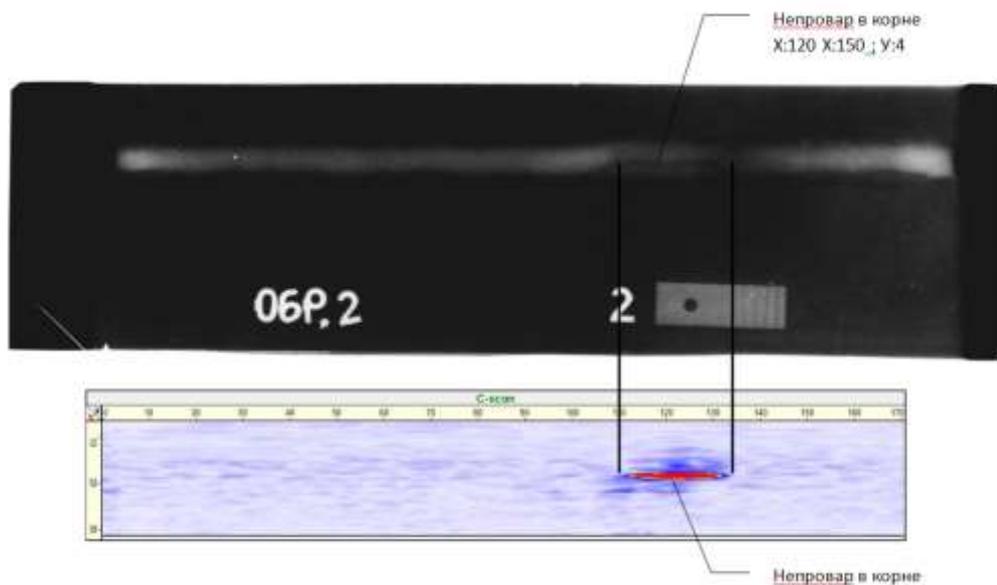


Рисунок 89 – Сопоставление результатов УЗК и радиографии образца обечайки пенала

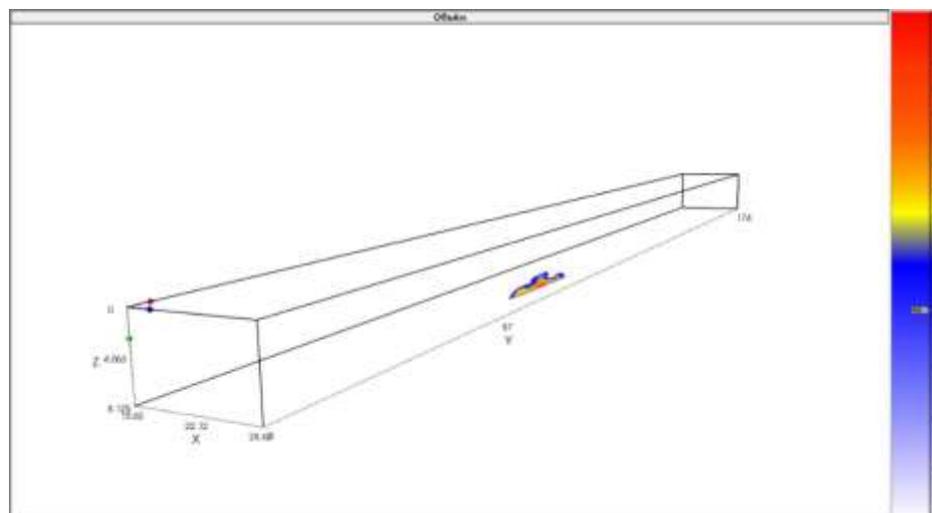


Рисунок 90 – Томография дефекта образца обечайки пенала

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

Также при контроле элементов обечайки обнаружен дефект, являющийся вольфрамовым включением. На рисунке 91 представлено сопоставление полученных результатов контроля (С-скан) с результатами радиографии. На рисунке 92 представлена томография найденного дефекта.

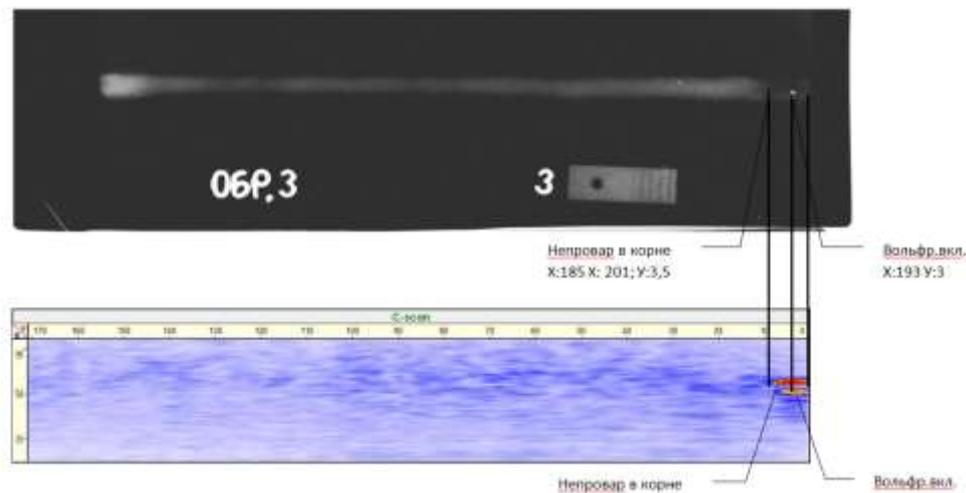


Рисунок 91 – Сопоставление результатов УЗК и радиографии образца обечайки пенала второго типа

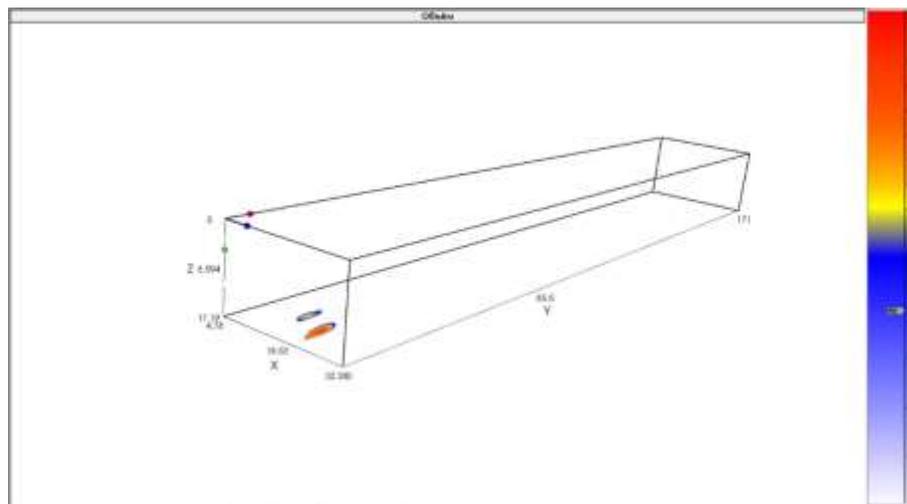


Рисунок 92 – Томография дефектов образца обечайки пенала второго типа

Так как вольфрамовые включения обладают гораздо большей плотностью по сравнению со стальной структурой сварного соединения, то они практически не пропускают рентгеновское излучение, вследствие чего на пленках возникают индикации светлого оттенка.

На изображениях, полученных при помощи предлагаемой методики УЗК, 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 кольца пенала (Рисунок 93).

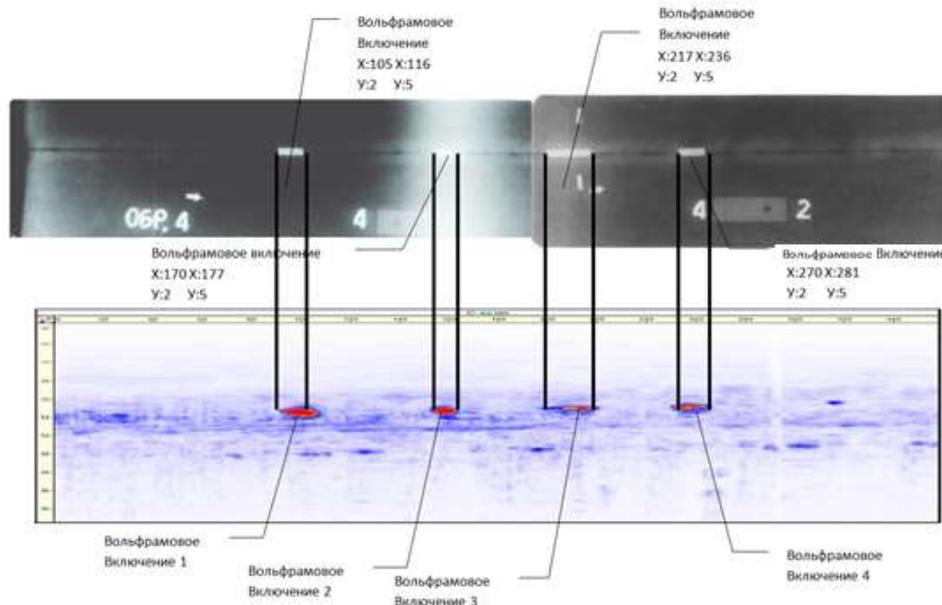


Рисунок 93 – Сопоставление индикаций от вольфрамовых включений, обнаруженных УЗК и радиографией элемента кольца пенала

Кроме того, на данном образце также можно показать наглядный пример обнаружений индикаций, соответствующих непровару корня шва, который на радиографических снимках будет выглядеть как затемненная протяженная линия.

Результаты УЗК, соответствующие непровару, представляются как индикации, протяженные в одном направлении параллельному сварному соединению и зачастую совпадают по высоте с индикацией от корня сварного соединения. Нужно отметить, что в случае несплавления, протяженность наблюдалась бы в другом направлении.

Сравнение индикаций для данных типов дефектов, полученных разными методами, представлено на рисунке 94.

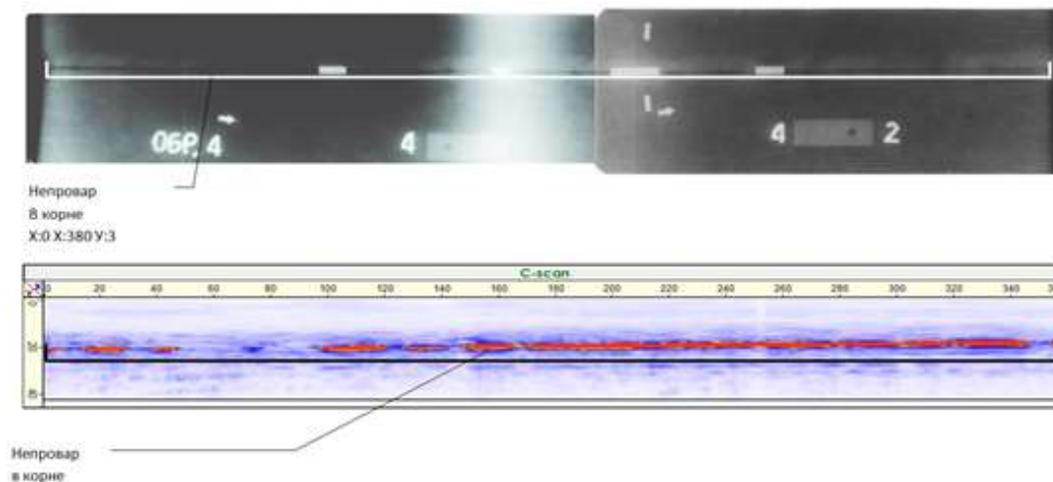


Рисунок 94 – Сопоставление индикаций от непровара в корне шва, обнаруженном УЗК и радиографией элемента кольца пенала

На рисунке 95 представлена томография объема с найденными дефектами в образце, являющимся элементом кольца пенала.

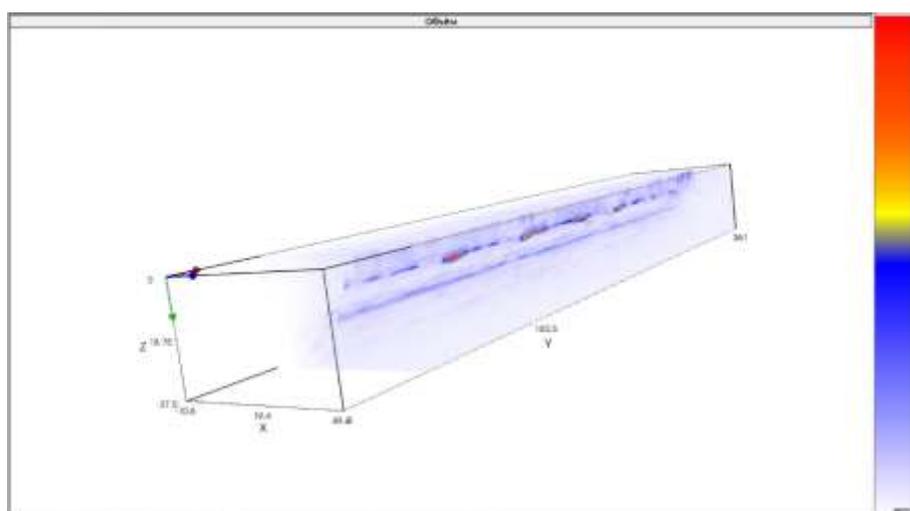


Рисунок 95 – Томография дефектов образца кольца пенала

Представленные выше результаты контроля экспериментальных образцов являются наиболее репрезентативными. Они были получены на основе применения разработанной методики. Сканирование, проведенное в соответствии со всеми параметрами, обозначенными в разделе 3.1, на основе применения метода цифровой фокусировки сигнала DFA и использования технологии реконструкции SAFT, позволило получить необходимые для последующего анализа входные воксельные данные.

Дальнейшая интерпретация производилась для каждой обнаруживаемой индикации отдельно, благодаря временной регулировке с учетом возможности изменения значений усиления сигнала. Анализ результатов произведен согласно способу, описанному в разделе 2.2.4,

а интерпретация обнаруженных несплошностей проводилась согласно разделу 2.2.3, описывающему соответствующий порядок в рамках предлагаемой методики.

Для представленного примера полученных в ходе апробации результатов была оценена погрешность измерений в соответствии с радиографическими данными в целях подтверждения достоверности методики. В таблице 11 приведены численные расчеты площади обнаруженных дефектов, рассмотренных выше, при чем значения для Образец 1 и Образец 2 соответствуют сканированию элементов обечайки пенала, а Образец 3 – кольцо пенала. Указанная погрешность показывает на сколько процентов отличались друг от друга значения площадей, полученные двумя разными методами.

Таблица 11 – Результаты эксперимента

| № | Тип дефекта | Ширина, мм РК | Ширина, мм УЗК | Протяженность, мм РК | Протяженность, мм УЗК | Площадь, мм ² РК | Площадь, мм ² УЗК | Отклонение, % |
|-----------|-------------|---------------|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| Образец 1 | | | | | | | | |
| 1 | непровар | 4,0 | 3,0 | 30 | 25,0 | 120 | 75,0 | 37 |
| Образец 2 | | | | | | | | |
| 1 | непровар | 3,5 | 2,7 | 16 | 14,0 | 56 | 49,0 | 6 |
| 2 | включение | 3,0 | 4,0 | 4 | 7,5 | 12 | 22,5 | 47 |
| Образец 3 | | | | | | | | |
| 1 | включение | 3,0 | 3,5 | 9 | 11,0 | 27 | 38,5 | 30 |
| 2 | включение | 3,0 | 3,0 | 7 | 10,0 | 21 | 30,0 | 30 |
| 3 | включение | 3,0 | 2,0 | 19 | 20,0 | 57 | 40,0 | 30 |
| 4 | включение | 3,0 | 2,3 | 11 | 10,0 | 33 | 23,0 | 23 |
| 5 | непровар | 3,0 | 3,0 | 380 | 360,0 | 1140 | 1080,0 | 5 |

Таким образом, было установлено, что разработанная методика позволяет достичь совпадения с результатами радиографического анализа до уровня около 75 %, что подтверждает ее достоверность (согласно ПНАЭ Г-7-030-91 п.4.6.8).

4.2 Автоматизированная сканирующая система для ультразвуковой томографии пенала для хранения ОЯТ

Экспериментальная апробация была проведена на лабораторных образцах, представляющих основные части реального пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000. Данные образцы являются плоскими и обладают сравнительно небольшими размерами, благодаря этому стало возможным проведение экспериментов с использованием лабораторной установки, имеющей трех-осевой манипулятор.

Так как реальный пенал для хранения ОЯТ является крупногабаритным цилиндрическим объектом, для внедрения разработанной методики в рамках технологического производства

необходимо дополнительно предусмотреть возможность сканирования подобного типа объектов. С этой целью была создана специализированная модульная автоматизированная система сканирования сварных соединений [103-107].

В рамках исследования спроектирован и изготовлен модульный манипулятор, позволяющий осуществлять сканирование как поперечных, так и продольных сварных швов пеналов для хранения ОЯТ.

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.

Несущая рама представляет собой мобильную рамную конструкцию, состоящую из двух полуколец, с возможностью замыкания и размыкания в цельное кольцо вокруг объекта для осуществления его замены. Таким образом происходит фиксация манипулятора в необходимом положении при использовании дополнительной системы фиксации.

Система фиксации в свою очередь представляет собой набор элементов пневмоавтоматики и тормозных электромагнитных муфт для обеспечения надежного и устойчивого положения манипулятора на пенале в процессе проведения сканирования сварных соединений.

В конструкции несущей рамы предусмотрены места крепления гибких кабель-каналов для организации требуемого положения в пространстве электрических, пневматических и гидравлических магистралей

Непосредственно сам модуль сканирования является рамной конструкцией и состоит из следующих элементов:

- блок преобразователей;
- система прижима блока преобразователей;
- привод горизонтального перемещения блока преобразователей.

Внутри модуля размещаются ультразвуковые преобразователи с призмами, прижимающиеся к объекту сканирования пневматическими пружинами и перемещающиеся в горизонтальном направлении посредством высокоточного привода для обеспечения сканирования требуемой ширины сварного шва.

Такой модуль позволяет производить измерения щелевым методом как с призмой, так и без нее. Щель заполняется контактной жидкостью на протяжении всего процесса сканирования,

роль контактной жидкости выполняет вода. Контактная плоскость призмы располагается на 0,1-0,3 мм от поверхности ОК. Схема размещения преобразователя с призмой представлена на рисунке 96.

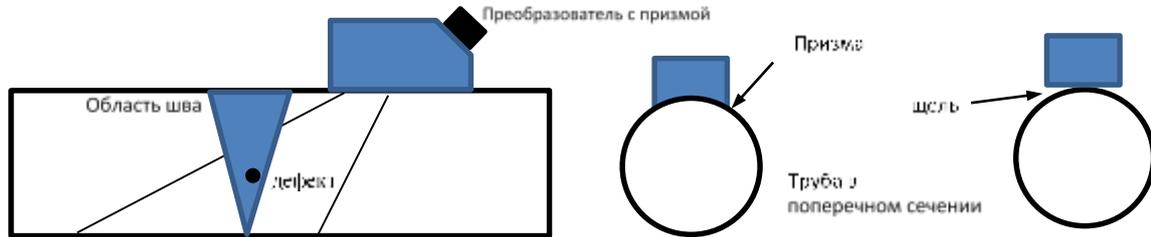


Рисунок 96 – Схема размещения преобразователя с призмой на ОК

С целью повышения точности результатов сканирования также предусмотрена возможность выполнения сканирования сварного шва с двух сторон (Рисунок 97). При этом контроль выполняется аналогично измерениям одним преобразователем. Разница заключается лишь в том, что одновременно используются два датчика.

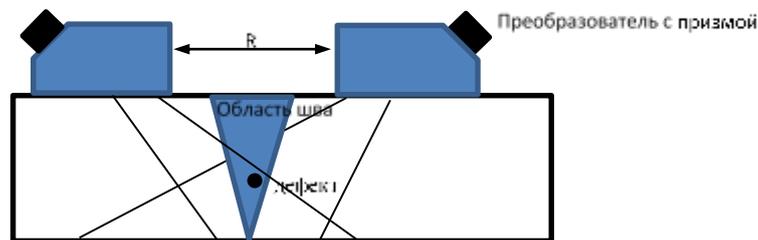


Рисунок 97 – Схема размещения двух преобразователей с призмой на ОК

Расстояние R (между призмами или датчиками) регулируется оператором вручную.

Привод горизонтального перемещения блока представляет собой стандартный узел, предназначенный для перемещения изделий с определенной точностью и скоростью, и состоит из двигателя фирмы Махон с интегрированными понижающим редуктором и энкодером. Кроме того, в конструкции привода предусмотрены концевые выключатели для настройки ширины сканирования сварного шва.

Система кругового перемещения навесного модуля сканирования представляет собой отдельный модуль, предназначенный для перемещения навесного оборудования по направляющим, установленным на несущей раме. Система состоит из рамной конструкции с салазками и привода окружного перемещения. Она является пневматической, состоит из

комплекта элементов, монтируемого на несущую раму, и пневмопривода перемещения, и работает автоматизировано.

Система окружного перемещения навесного модуля сканирования также включает в себя привод перемещения навесного модуля, состоящий из двигателя фирмы Maxon с интегрированными понижающим редуктором и энкодером.

Направляющие системы в данном случае являются сегментными, замыкаются в единое кольцо при монтаже на несущей раме и содержат в своей конструкции V-образный профиль и зубчатый венец для надежного и точного кругового перемещения навесного модуля.

Кроме того, система содержит пассивные и активные колесные опоры, монтируемые с разных сторон несущей рамы. Пассивные колесные опоры предназначены для придания несущей раме положения, позволяющего ей свободно перемещаться в осевом направлении вдоль пенала. Активные – для автоматизированного осевого перемещения несущей рамы вдоль пенала при помощи привода осевого перемещения.

Система подачи рабочей среды необходима для подачи воды в зазор между призмами измерительных преобразователей и поверхностью объекта сканирования и представляет собой отдельный модуль.

В состав системы входят следующие элементы:

- емкость с контактной средой;
- гидравлический насос;
- фильтр тонкой очистки;
- манометр или датчик давления;
- регулятор расхода контактной среды;
- регулятор давления подачи контактной среды.

Разработанная модель сканирующей системы для ультразвуковой томографии пенала для хранения ОЯТ представлена на рисунке 98. Сборочный чертеж и чертеж общего вида сканирующего устройства приведены в приложении Г.



Рисунок 98 – Модель сканирующей системы для ультразвуковой томографии пенала для хранения ОЯТ

Основные характеристики сканирующей системы приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики сканирующей системы ультразвуковой томографии

| Параметр | Значение |
|---|-----------------------|
| Температурный диапазон работы | от -30 до +30 °С |
| Номинальная скорость перемещения каретки с датчиками в продольном направлении | 100 мм/с |
| Повторяемость позиционирования каретки в продольном направлении | ±0,02 мм |
| Номинальная скорость перемещения каретки с датчиками в круговом направлении | 100 мм/с |
| Повторяемость позиционирования каретки в круговом направлении | ±0,02 мм |
| Максимальное рабочее давление всех пневмосистем | 6 бэр |
| Линейная скорость передвижения сканирующего устройства | ≤ 2 км/ч |
| Диапазон значений диаметра ОК | 580-680 мм |
| Максимальная ширина сканирования сварного шва | 200 мм |
| Скорость размыкания/замыкания несущей рамы | 1 м/с |
| Напряжение питания датчиков | 15-24 В |
| Объем емкости для контактной среды | 10 л |
| Расчетный расход воды при сканировании | 0,056 л/с |
| Давление вырабатываемое насосом | 6 кгс/см ² |

В рамках выполнения исследований разработанная модель была реализована, и осуществлено сканирование специально разработанного макета пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000. Так как реальный пенал является дорогостоящим объектом собственности Госкорпорации «Росатом», то проведение эксперимента проводилось на указанном разработанном макете, который полностью повторяет габариты реального объекта и таким образом позволяет апробировать предложенную методику в лабораторных условиях (Рисунок 99).



Рисунок 99 – Реализация автоматизированной системы ультразвуковой томографии модели пенала для хранения ОЯТ

Пример результатов, полученные при инспекции лабораторного макета пенала представлен на рисунке 100.

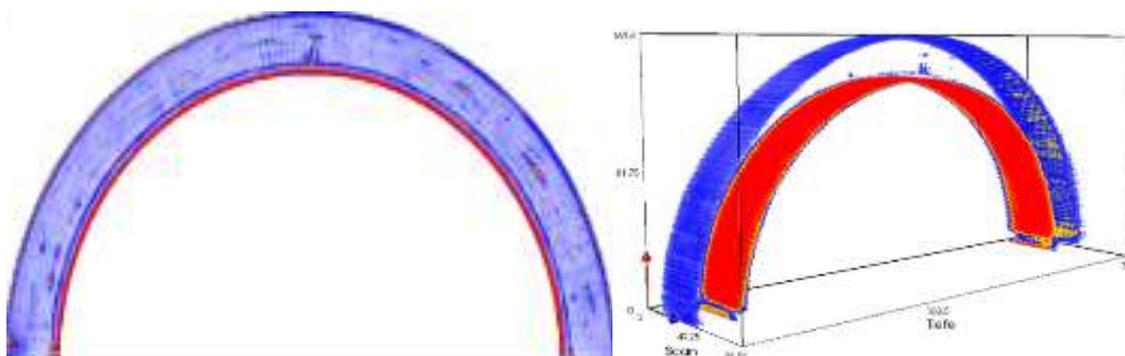


Рисунок 100 – Результаты ультразвуковой томографии модели пенала для хранения ОЯТ разработанным сканирующим манипулятором

4.3 Вывод к главе 4

По итогам 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, можно подтвердить возможность применения разработанной методики ультразвуковой томографии для контроля пеналов в качестве альтернативы радиографическим методам или в качестве совмещения этих двух методов.

Результаты эксперимента были сопоставлены с результатами РК образцов, проведенными предварительно. Согласно анализу, было установлено, что они совпадают с точностью в

пределах 72,3-75,1 %, что можно считать приемлемым уровнем достоверности. Можно утверждать, что разработанная методика способна обеспечить эффективную оценку качества сварных соединений пеналов для сухого хранения ОЯТ при условии наличия соответствующей автоматизированной сканирующей системы.

В данной главе рассмотрена разработанная модель системы сканирования, а также ее реализация. Спроектирован и изготовлен модульный манипулятор, позволяющий осуществлять сканирование как поперечных, так и продольных сварных швов пеналов для хранения ОЯТ.

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.

Приведены результаты сканирования специально разработанного лабораторного макета, обладающего габаритами реального пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 подтверждающие применимость методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АЭ, как один из источников безуглеродной энергии, активно развивается. В связи с чем в России было принято решение о переходе на замкнутый ЯТЦ. В свою очередь это требует развития методов сухого хранения ОЯТ. В настоящий момент для этих целей на базе ФГУП ФЯО «ГХК» (г. Железногорск) построено и введено в эксплуатацию централизованное сухое хранилище. ОЯТ размещается в специализированных стальных пеналах, которые герметизируются при помощи сварных соединений. На сегодняшний день для контроля качества данных сварных соединений применяются методы РК. Но они обладают рядом существенных недостатков, таких как дополнительный риск облучения персонала и большие временные и материальные затраты на реализацию. В то же время, современный уровень развития ультразвуковых технологий позволяет разрабатывать методики эффективного автоматизированный контроля качества с возможностью представления результатов в виде трехмерных изображений, что существенно повышает точность интерпретации. Такой подход реализуется методами ультразвуковой томографии. Соответственно, возможность проведения ультразвуковой томографии сварных соединений пеналов для хранения ОЯТ обеспечит перспективную альтернативу РК. Таким образом, разработка методики ультразвуковой томографии сварных соединений пенала для хранения ОЯТ реакторов типа РБМК-1000 стало целью настоящего диссертационного исследования.

Основные результаты исследования, проведенного в диссертационной работе приведены ниже:

1) Разработана БД сварных соединений пеналов с ОЯТ в соответствие 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. Также 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° , 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 данным РК, соответствие составило более, чем 72 %. 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 № 11.6342.2017/8.9.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

DFA – Digitally Focused Array;
FMC – Full Matrix Capture;
SAFT – Synthetic array focusing technique;
TFM – Total Focusing Method;
АКС – Акустические Контрольные Системы;
АЭ – атомная энергетика;
АЭС – атомная электростанция;
БД – база данных;
ВВЭР – водо-водяной реактор;
ГХК – «Горно-химический комбинат»;
ДН – диаграмма направленности;
МКК – межкристаллитная коррозия;
ОК – объект контроля;
ОТВС – отработавшая тепловыделяющая сборка;
ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;
ПО – программное обеспечение;
ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;
РАО – радиоактивные отходы;
РБМК – реактор большой мощности канальный;
РК – радиографический контроль;
СОП – стандартный образец предприятия;
ТВС – топливная сборка;
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
ТУК – транспортный упаковочный комплект;
УЗК – ультразвуковой контроль;
ФАР – фазированная антенная решетка;
ФЦП – Федеральная целевая программа;
ЯТЦ – ядерно-топливный цикл.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) На ПО «Маяк» доставлено отработавшее ядерное топливо реакторов ВВЭР-1000 с Ростовской АЭС [Электронный ресурс] // Росатом. – Режим доступа: <http://www.rosatom.ru/journalist/news/na-po-mayak-dostavleno-otrabotavshee-yadernoe-toplivo-reaktorov-vver-1000-s-rostovskoy-aes/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.05.2017).
- 2) Никитин, А.Н. Ядерные делящиеся материалы / А.Н. Никитин, В.К. Кузнецов, Л.А. Золотков. – СПб: ЭПЦ «Беллона», 2012. – 114 с.
- 3) Подписан акт о завершении сооружения комплекса «сухого» хранения ОЯТ на ГХК [Электронный ресурс] // Nuclear.ru. – Режим доступа: <http://www.nuclear.ru/news/97930/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.05.2017).
- 4) Пат. 2435239: МПК G21С. Герметичный пенал хранения отработавшего ядерного топлива. Средства для крепления или хранения топливных, или управляющих элементов / Ревенко Ю.А., Бараков Б.Н., Федосов Ю.Г., Калинин В.И., Гаврилов П.М., Гамза Ю.В.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат». – № 2010129383/07, заявл.: 15.07.2010; опубл.: 27.11.2011, Бюл. № 33. – 8 с.
- 5) 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. – 688 с.
- 6) Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades / I. Amenabar [et al.] // Composites Part B: Engineering, 2011. – Vol. 42. – №5. – P. 1298-1305.
- 7) Ультразвуковая дефектometрия металлов с применением голографических методов / В.Г. Бадалян [и др.]; под. ред. А.Х. Вовилкина. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.
- 8) Вовилкин, А.Х. Ультразвуковая дефектometрия сварных соединений в энергетике / А.Х. Вовилкин // Сварка и диагностика. – М.: НАКС Медиа, 2007. – №4. – С. 8-10.
- 9) Вовилкин, А.Х. Опыт применения систем Авгур 5.2 для контроля аустенитных сварных соединений оборудования реакторной установки ВВЭР-440 / А.Х. Вовилкин, П.Ф. Самарин, Д.С. Тихонов // 6-я Межд. научно-технич. конф. по обеспечению безопасности АЭС с ВВЭР (26-29 мая 2009 г., Подольск). – 12 с.
- 10) Базулин, Е.Г. Получение изображений дефектов когерентными методами с учетом многократного отражения от плоскопараллельных границ объектов контроля при ультразвуковом контроле / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия, 2007. – №7. – С. 48-70.

11) Базулин, Е.Г. Получение изображения дефектов методом SAFT с учетом переменной скорости звука в объекте контроля / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия, 2010. – №11. – С. 3-13.

12) Самокрутов, А.А. Ультразвуковая эхо-томография металлоконструкций. Состояние и тенденции / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2007. – Т. 73. – №1. – С. 50-59.

13) Самокрутов, А.А. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика, 2011. – №10. – С. 63-70.

14) Самокрутов, А.А. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Дефектоскопия, 2011. – №. 1. – С. 21-38.

15) На ПО «Маяк» начинается программа по переработке некондиционного ОЯТ реакторов РБМК [Электронный ресурс] // Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года». – Режим доступа: <http://фцп-яrb2030.рф/society/news/na-po-mayak-nachinaetsya-programma-po-pererabotke-nekonditsionnogo-oyat-reaktorov-rbmk/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 14.06.2017).

16) Росатом готов начать промышленную переработку ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] // РИА новости. – Режим доступа: <https://ria.ru/atomtec/20170315/1490047973.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 14.06.2017).

17) Борьба за рынок ядерных отходов только началась [Электронный ресурс] // Независимая. – Режим доступа: http://www.ng.ru/events/2001-08-02/1_fight.html, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 14.06.2017).

18) «Сухой» прорыв в будущее [Электронный ресурс] // Вестник ГХК. – Режим доступа: http://www.sibghk.ru/attachments/article/6794/2016_24_520.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 14.06.2017).

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

20) Хранение ОЯТ – обязательное условие развития атомной энергетики [Электронный ресурс] / В.И.Калинкин [и др.] // PRoAtom, 2006. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=770>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 16.06.2017).

21) Singh K. P. System and method of storing and/or transferring high level radioactive waste: пат. 7933374 США. – 2011.

22) Carver G. et al. Container and method for storing or transporting spent nuclear fuel: пат. 8630384 США. – 2014.

23) Dyck H. P., Spilker H., Gregor H. D. Concrete shielding housing for receiving and storing a nuclear fuel element container: пат. 4527066 США. – 1985.

24) German approach and experience feedback of transport ability of SNF packages after interim storage / F. Wille [et al.] // 17th International Symposium on the Packaging and Transport of Radioactive Materials (August 18-23, 2013, San Francisco, CA, USA). – 2013.

25) McKinnon, M.A. Spent nuclear fuel storage – Performance tests and demonstrations / M.A. McKinnon, V.A. DeLoach // Pacific Northwest Laboratory, 1993. – №PNL – P. 8451.

26) Management of spent fuel from power and research reactors using CASTOR and CONSTOR casks and licensing experience in Germany / A. Vossnacke [et al.] // International conference on storage of spent fuel from power reactors, 2003. – P. 142-149.

27) Вопросы транспортировки ОЯТ [Электронный ресурс] // Ядерная опасность. – Режим доступа: <http://www.yabloko.ru/Publ/Atom/atom00025.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.06.2017).

28) Жеребцов, А. Мировые тенденции обращения с ОЯТ и РАО / А. Жеребцов, В. Кашеев, М. Ожован. // Вестник Атомпром, 2012. – Т. 3. – С.10.

29) НПО ЦКТИ: Актуальность создания новых контейнеров для ОЯТ ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] // Российское Атомное Сообщество. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/technology/40162?page=2>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.06.2017).

30) Васильев, А.С. Перспективные направления создания экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива / А.С. Васильев, А.В. Романов, П.О. Щукин // Инженерный вестник Дона, 2012. – №3. – С. 56-73.

31) Advantages of dry hardened cask storage over wet storage for spent nuclear fuel [Electronic resource] / L.S. Romaanto // International Nuclear Atlantic Conference-INAC 2011 Proceedings. – Access mode: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105214.pdf.

32) Пат. 2500045 Российская Федерация: МПК G21F. Герметичный пенал хранения ампул с пучками отработавших тепловыделяющих элементов / Гаврилов П.М., Кравченко В.А., Гамза Ю.В., Бараков Б.Н., Ильиных Ю.С.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат». – № 2012123112/07, заявл.: 04.06.2012; опубл.: 27.11.2013, Бюл. №33. – 11 с.

33) Replacement of Radiography with Ultrasonics for the Nondestructive Inspection of Welds – Evaluation of Technical Gaps – An Interim Report / T.L. Moran [et al.] // Pacific Northwest National Laboratory, 2010. – P. 84.

- 34) Spent Fuel Project Office [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/isg/isg-4R1.pdf>.
- 35) Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля: ПНАЭ Г. 7-010-89. – Взамен ПК 1514-72; Введ. 01.06.90.
- 36) Novel passive and active tungsten-based identifiers for maintaining the continuity of knowledge of spent nuclear fuel copper canisters / D. Chernikova [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*, 2014. – Vol. 75. – P. 219-227.
- 37) Remote Welding, NDE and Repair of DOE Standardized Canisters / E. Larsen [et al.] // 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear & Pressurized Components (May 2006, San Diego). – P. 74-89.
- 38) Inspection of used fuel dry storage casks / D.C. Kunerth [et al.] // Technical report INL/EXT-12-27119. – 2012. – 30 p.
- 39) Muller, C. Reliability in NDT of Canister for the Swedish Spent Nuclear Fuel / C. Muller, M. Pavlovic // 4th European-American Workshop on Reliability of NDT (June 2009, Berlin). – 9 p.
- 40) Nageswaran, C. Immersion transmit-receive longitudinal phased array probe for stainless steel / C. Nageswaran, C. Bird, A. Whittle // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2008. – Vol. 50. – №12. – P. 673-678.
- 41) POD Evaluation of NDE Techniques for Canister-Components for Risk Assessment of Nuclear Waste Encapsulation / C. Muller [et al.] // 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components (October 2007, Budapest). – P. 36-40.
- 42) Pitkänen, J. Inspection of Disposal Canisters Components / J. Pitkänen // Working Report – 35 (December 2013). – 22 p.
- 43) Пособие по методам контроля качества сварных соединений металлических конструкций и трубопроводов, выполняемых в строительстве (к СНиП III-18-75) // ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1988.
- 44) Зацепин, А.Ф. Акустический контроль: учебное пособие / А.Ф. Зацепин; под редакцией В.Е. Щербинина // Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 211 с.
- 45) Verkooijen, J. Sampling phased array a new technique for ultrasonic signal processing and imaging / J. Verkooijen, A. Boulavinov // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2008. – Vol. 50. – №3. – P. 153-157.

46) Application of Sampling Phased Array Technique for ultrasonic inspection of CFRP components / A. Bulavinov [et al.] // International Symposium on NDT in Aerospace (3-5 December, 2008, Berlin). – 8 p.

47) Pudovikov, S. Innovative ultrasonic testing (UT) of nuclear components by sampling phased array with 3D visualization of inspection results / S. Pudovikov, A. Bulavinov, R. Pinchuk // DGZfP Proceedings BB, 2010. – Vol. 125. – P. 167-178.

48) Reliability considerations of NDT by probability of detection (POD) determination using ultrasound phased array / J.H. Kurz [et al.] // Engineering failure analysis, – 2013. – Vol. 35. – P. 609-617.

49) Post-processing of phased-array ultrasonic inspection data with parallel computing for nondestructive evaluation / X. Guan [et al.] // Journal of Nondestructive Evaluation, 2014. – Vol. 33. – №3. – P. 342-351.

50) High-selectivity imaging of closed cracks in a coarse-grained stainless steel by nonlinear ultrasonic phased array / Y. Ohara [et al.] // NDT & E International, 2017. – Vol. 91. – P. 139-147.

51) Three-dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique / K. Mayer [et al.] // Ultrasonics, 1990. – Vol. 28. – №. 4. – P. 241-255.

52) NDE to Manage Atmospheric SCC in Canisters for Dry Storage of Spent Fuel: An Assessment / R. Meyer [et al.] // Pacific northwest national laboratory, September 2013. – 10 p.

53) Первые результаты опытно-промышленного внедрения средств механизированного ультразвукового контроля на объектах ООО «СГМ» [Электронный ресурс] // Стройгазмонтаж. – Режим доступа: <http://www.ooosgm.ru/press/articles/pervye-rezultaty-opytno-promyshlennogo-vnedreniya-sredstv-mekhanizirovannogo-ultrazvukovogo-kontrolya/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.07.2017).

54) Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ntcexpert.ru/documents/docs/RD-25_160_10-KTN-016-15.pdf.

55) Application of phased arrays in combination with virtual dynamic focusing for ultrasonic tomographic imaging of metals [Electronic resource] / S.G. Alekhin [et. al.]. – Access mode: <http://www.acsys.ru/eng/article/application-of-phased-arrays-in-combination-with-virtual-dynamic-focusing-for-ultrasonic-tomographic/>.

56) Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / В.Г. Бадалян [и др.]; под. ред. А.Х. Вовилкина. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.

57) Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки [Электронный ресурс] / Е.Г. Базулин //

Naukarus. – Режим доступа: <http://naukarus.com/sravnienie-sistem-dlya-ultrazvukovogo-nerazrushayuschego-kontrolya-ispolzuuyuschih-antennye-reshetki-ili-fazirovannye-anten>.

58) R/D Tech Guideline: Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications – Quebec: R/D Tech Inc., 2004. - 368 p.

59) X-32 – ультразвуковой дефектоскоп на фазированной решетке (Harfang) // Средства акустического контроля: технический справочник. – СПб.: Свен, 2008. – С. 130-131.

60) Phased Array Ultrasonic Testing for Post-Weld and OnLine Detection of Friction Stir Welding Defects / D.J. Huggett [et al.] // Research in Nondestructive Evaluation, 2016. – P. 1-24.

61) Von Ramm, O.T. Real time volumetric ultrasound imaging system / O.T. Von Ramm S.W. Smith // Journal of Digital Imaging, 1990. – Vol. 3. – №4. – P. 261.

62) Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А.В. Ковалев [и др.] // Дефектоскопия, 1990. – №2. – С. 29-41.

63) Kozlov, V.N. Thickness Measurements and Flaw De-tection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method / V.N. Kozlov, A.A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin // Nondestructive Testing and Evaluation, 1997. – Vol. 13. – P. 73-84.

64) Пат. 2080592 Рос. Федерация: МПК6 G01N29. Ультразвуковая антенная решетка в виде двумерной матрицы / Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью «Фирма АКС». – №94006268/28, заявл.: 21.02.1994; опубл.: 27.05.1997, Бюл. № 15. – 15 С.

65) Le Ber, L. Application and Simulation of Advanced Ultrasonic Array Techniques / L. Le Ber, O. Roy, F. Reverdy, S. Mahaut // 10th ECNDT (June 7-11, 2010, Moscow). – 2010. – Rep. 1.3.15.

66) Jobst, M. Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds / M. Jobst, G. Connolly // 10th ECNDT (June 7-11, 2010, Moscow). – 2010. – Rep. 1.3.4.

67) Ultrasonic inspection of spent nuclear fuel casks / I. Bolotina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 81. – №1. – N. 012073.

68) Воеводин, В.Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века / В.Н. Воеводин // Вопросы атомной науки и техники, 2007. – С. 59-70.

69) Межкристаллитная коррозия аустенитных сталей / А.Н. Баранов [и др.] // Системы. Методы. Технологии, 2015. – №2. – С. 142-147.

70) Способы уменьшения пористости при аргонодуговой сварке тонколистового титана / Б.В. Кудояров [и др.] // Сварочное производство, 1971. – №11. – С. 54-55.

71) Науменко, А.А. Формирование структуры и комплекса свойств хладостойкой стали для труб класса прочности К65 при термомеханической обработке: дис. ...канд. тех. наук 05.16.01: защищена 05.10.11: утв. 15.05.11 / Науменко Алексей Александрович. – М., 2011. – 156 с. – 61 11-5/3133.

- 72) Зарипов, М.З. Модернизация технологии изготовления сварных аппаратов из стали 12Х18Н10Т с применением вибрационной обработки / М.З. Зарипов. – Уфа, 2010. – 132 с.
- 73) Бродский, А.Я. Аргодуговая сварка вольфрамовым электродом / А.Я. Бродский. – М.: Машгиз. – 1956.
- 74) Пункты сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности: НП-035-02. – введ. 01.01.2003.
- 75) Отработавшие тепловыделяющие сборки энергетических реакторов. Сухое хранение ОТВС РБМК-1000 и ВВЭР-1000 технические требования: ОСТ 95 10585-2003. – введ. 01.05.2004.
- 76) Оборудование для работы с радиоактивными средами. Сварные соединения. Правила контроля: ОСТ 95-39-2002. – Взамен ОСТ 95 39-91; введ. 01.06.2002.
- 77) Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов // Газпром С.Т.О. 2-2.4-083-2006. – 2006. – Т. 12. – С. 001-96.
- 78) Manufacturing of welded joints with realistic defects [Electronic resource] / M. Consonni [et al.] // TWI. – Access mode: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/manufacturing-of-welded-joints-with-realistic-defects/>.
- 79) Дефекты сварных соединений [Электронный ресурс] // Сварка и сварщик. – Режим доступа: <http://welding.com/defekty-svarnyh-soedineniy>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.07.2017).
- 80) Дефекты сварных соединений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tool-land.ru/defekty-svarnykh-shvov.php>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.07.2017).
- 81) Троицкий, В.А. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.А. Троицкий, В.Ю. Попов. – К.: Феникс, 2010. – 224 с.
- 82) Pudovikov, S. Optimierung und Nachweis der Ultraschallprüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen an austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen / S. Pudovikov. – 2013. – 48 p.
- 83) Николаев, Г.А. Расчет сварных конструкций и соединений / Г.А. Николаев. – М: «Высшая школа», 1965. – 452 с.
- 84) Глухов, Б.В. Детали машин: в 2 ч. / Б.В. Глухов, В.В. Крашенинников, В.М. Потапов. – Новосибирск: Изд. НГПУ, 2012. – 313 с.
- 85) Павлов, П.А. Механические состояния и прочность материалов / П.А. Павлов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. – 176 с.
- 86) Куркин, С.А. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / С.А. Куркин. – М.: «Машиностроение», 1975. – 376 с.

87) Седанова, Е.П. 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.

88) 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.

89) 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.

90) 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.

91) Твердохлебова, Т.С. 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.

92) 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.

93) 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.

94) Абрамец, В.В. 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.

95) 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.

96) 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.

97) 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.

98) Ключев, В.В. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / В.В. Ключев, И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред. В.В. Ключева // Ультразвуковой контроль, 2004. – Т.3. – 213 с.

99) Контроль неразрушающий Соединения сварные. Методы ультразвуковые: ГОСТ 14782-86. – Взамен ГОСТ 22368-77; введ. 01.01.1988.

100) Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: ГОСТ Р. 55724-2013. – введ. 01.07.2015.

101) Контроль неразрушающий Преобразователи ультразвуковые Общие технические требования: ГОСТ 26266-90. – Взамен ГОСТ 26266-84; введ. 01.01.1991.

102) Non-destructive testing. Characterization and verification of ultrasonic examination equipment: EN 12668. – Part 2. – British Standards. – 2010.

103) Ultrasonic signal processing in order to improve the quality of assesment of nuclear industry's components / Y.A. Salchak [et al.] // European Nuclear Society Conference: Proceedings (October 9-13, 2016, Warsaw). – Brussels: ENS, 2016. – P. 77-78.

104) The Classification of Weld Seam Defects for Quantitative Analysis by means of Ultrasonic Testing / Y.A. Salchak [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. – 2016. – Vol. 132. – Article number: 012027.

105) 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. – Vol. 102. – Article number: 01015.

106) Principles of construction of ultrasonic tomographs for solution of problems of nondestructive testing in mechanical engineering / Y.A. Salchak [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124. – Iss. 1. – Article number. 012149.

107) Dry storage casks monitoring by means of ultrasonic tomography / Y.A. Salchak [et al.] // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 70. – P. 484-487.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Требования к качеству сварных соединений согласно нормативным документам

Таблица А.1 – Требования к сварным соединениям при РК согласно ОСТ 95-39-2002 [76]

| Вид несплошности и других отклонений | Категория сварного соединения | | | |
|---|--|----|--|--|
| | I | II | III | IV |
| Трещина | Не допускается | | | |
| Свищ, усадочная раковина | Не допускается | | | |
| Вогнутость корня шва | Допускается в местах, недоступных для подварки, глубиной до 10 % от номинальной толщины свариваемого металла, но не более 1,5 мм | | Допускается в местах, недоступных для подварки, глубиной до 15 % от номинальной толщины свариваемого металла, но не более 2,0 мм | |
| Выпуклость корня шва | Допускается при односторонней сварке труб и листовых конструкций равномерная или бугристая выпуклость корня шва: - до 1,5 мм, но не более 10 % внутреннего диаметра ϕ_B для труб D_y до 30 мм; - до 2,0 мм – для труб D_y 30 мм и более, но при наличии контроля прогонкой металлического шарика – не более 5 % от ϕ_B ; - до 2,5 мм, но не более 25 % толщины стенки, для листовых конструкций | | | |
| Непровар | Не допускается | | | Допускаются отдельные участки длиной до 20 мм, но в сумме не более 15 % от длины шва |

Таблица А.2 – Нормы на одиночные включения и скопления, допускаемые в сварных соединениях при РК согласно ОСТ 95-39-2002 [76]

| Категория сварного соединения | Номинальная толщина сваренных деталей, в месте сварки, мм | Одиночные включения и скопления | | | | Одиночные крупные включения | | |
|-------------------------------|---|---|---------------|--|---|-----------------------------|---|--|
| | | Допускаемый наибольший размер (диаметр) | | Допускаемое число включений и скоплений на любом участке сварного соединения длиной 100 мм | Допускаемая суммарная приведенная площадь включений и скоплений на любом участке сварного соединения длиной 100 мм, мм ² | Допускаемые | | Допускаемое число на любом участке сварного соединения длиной 100 мм |
| | | Включения, мм | Скопления, мм | | | Наибольший размер, мм | Наибольшая площадь одного включения, м ² | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| I | Св. 5 до 8 включ. | 1,0 | 1,8 | 12 | 5,5 | 3,5 | 4,2 | 1 |
| II | | 1,2 | 2,0 | 13 | 8,5 | 4,0 | 6,0 | 2 |
| III | | 1,5 | 2,5 | 13 | 8,5 | 5,0 | 7,5 | 3 |
| IV | | 1,8 | 3,0 | 14 | 9,0 | 7,0 | 11,2 | 3 |
| I | Св. 3 до 5 включ. | 0,6 | 1,2 | 11 | 2,5 | 3,0 | 2,4 | 1 |
| II | | 0,8 | 1,2 | 11 | 3,0 | 4,0 | 3,2 | 1 |
| III | | 1,0 | 1,5 | 13 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 2 |
| IV | | 1,2 | 1,8 | 14 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 3 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

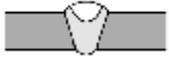
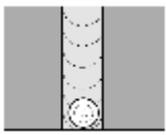
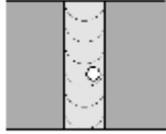
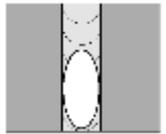
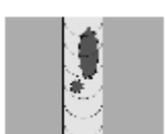
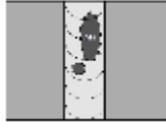
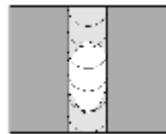
(обязательное)

Требования к сварным соединения пенала для хранения ОЯТ

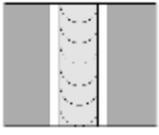
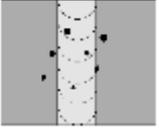
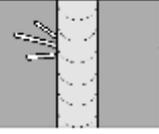
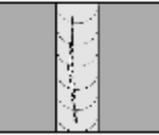
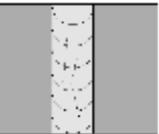
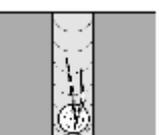
Таблица Б.1 – Требования к основным типам сварных соединений пенала для хранения ОЯТ

| Название дефекта | Вид дефекта | Определение | Схематическое изображение | | Допустимые размеры |
|------------------|-----------------|---|---------------------------|---------|--|
| | | | В сечении | В плане | |
| Поры | Газовая полость | Полость произвольной формы, образованная газами, задержанными в расплавленном металле, которая не имеет углов | | | при $L \geq 3d$: $d, h, l_t \leq 0,1S$, но $\leq 2,0$ мм; $\sum D \leq 30$ мм |
| | Газовая пора | Газовая полость, обычно сферической формы | | | $d \leq 0,1S$, но $\leq 2,0$ мм; $\sum D \leq 30$ мм |
| | Цепочка пор | Ряд газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси сварного шва, с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из пор | | | $d, h, l_t \leq 0,1S$, но $\leq 1,5$ мм; $l_t \leq S$, но $\leq 30,0$ мм $\sum D \leq 30$ мм |
| | Скопления пор | Группа газовых полостей (три или более), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из полостей | | | $d, h, l_t \leq 0,1S$, но $\leq 1,5$ мм; $l_t \leq S$, но $\leq 30,0$ мм $\sum D \leq 30$ мм |
| | Канальные поры | Несплошность, вытянутая вдоль оси сварного шва. Длина несплошности не менее чем в два раза превышает высоту | | | при $L \geq 3d$: $d, h, l_t \leq 0,1S$, но $\leq 2,0$ мм; $\sum D \leq 30$ мм |
| | Свищ | Трубчатая полость в металле сварного шва, вызванная выделением газа. Форма и положение свища определяются режимом затвердевания и источником газа. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются елочкой | | | Не допускаются |

Продолжение таблицы Б.1

| | | | | | |
|--------------------------|----------------------------------|---|---|--|---|
| Поры | Кратер | Усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов |  |  | Не допускается |
| | Поверхностная пора | Газовая пора, которая нарушает сплошность поверхности сварного шва |  |  | $d \leq 0,1S$, но $\leq 2,0$ мм; $\sum D \leq 30$ мм |
| | Усадочная раковина | Полость, образующаяся вследствие усадки во время затвердевания |  |  | Не допускается |
| Твёрдые включения | Шлаковые включения | Шлак, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть: линейными, разобщенными |  |  | $h \leq 0,1S$, при $l_r \leq 2,5$ мм; $l_l \leq 0,5S$, но не более 5,0 мм; $\sum D \leq 30$ мм $d, h, l_r \leq 0,1S$, но $\leq 1,0$ мм; $l_l \leq S$, но $\leq 15,0$; $\sum D \leq 30$ мм |
| | Металлические включения | Частица инородного металла, попавшая в металл сварного шва (вольфрам) |  |  | $d, h, l_r \leq 0,1S$, но $\leq 1,5$ мм; $l_l \leq 3,0$ мм, при $L \leq 50$ количество включений: не более 1 для труб диаметром ≤ 219 мм. Не более 2 на 300 мм шва для труб диаметром > 219 мм |
| Несплавления и непровары | Несплавление | Отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва |  |  | $l_l \leq 2S$, но ≤ 25 мм; $\sum D \leq 25$ мм |
| | Непровар | Несплавление основного металла по всей длине шва или на участке, возникающее вследствие неспособности расплавленного металла проникнуть в корень соединения |  |  | $h \leq 0,05S$, но $\leq 0,75$ мм; $l_l \leq S$, но $\leq 12,5$ мм; $\sum D \leq 25$ мм |
| Нарушение формы шва | Вогнутость корня шва (утяжина) | Неглубокая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва, образовавшаяся вследствие усадки |  |  | $h \leq 0,1S$, но $\leq 1,0$ мм; $l_l \leq S$, но ≤ 30 мм; $\sum D \leq 50$ мм |
| | Превышение проплавления (провис) | Избыток наплавленного металла на обратной стороне стыкового шва сверх установленного значения |  |  | $h \leq 3,0$ мм; $l_l \leq 0,5S$; $\sum D \leq 30$ мм |

Продолжение таблицы Б.1

| | | | | | |
|---------------------|---------------------|--|---|---|--|
| Нарушение формы шва | Подрезы | Углубление продольное на наружной поверхности валика сварного шва, образовавшееся при сварке |  |  | $h \leq 0,1S$, но $\leq 0,5$ мм; $l_1 \leq 150$ мм; |
| | Смещение кромок | Несовпадение уровней расположения внутренних и (или) наружных поверхностей свариваемых (сваренных) деталей в стыковых сварных соединениях. |  |  | $h \leq 0,2S$, но $\leq 2,0$ мм – для труб с $S \leq 10$ мм |
| Прочие дефекты | Вольфрамовые брызги | Частицы вольфрама, выброшенные из расплавленной зоны электрода на поверхность основного металла или затвердевшего металла сварного шва |  |  | Не допускается |
| | Случайная дуга | Местное повреждение поверхности основного металла, примыкающего к сварному шву, возникшее в результате случайного горения дуги |  |  | Не допускается |
| Трещины | Трещины | Несплошность, вызванная местным разрывом шва, который может возникнуть в результате охлаждения или действия нагрузок |  |  | Не допускается |
| | Микротрещины | Трещина, имеющая микроскопические размеры, которую обнаруживают физическими методами не менее чем при пятидесятикратном увеличении |  |  | |
| | Трещины в кратере | Трещина в кратере сварного шва, которая может быть: продольной, поперечной, звездообразной |  |  | Не допускается |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Описание организации внутримашинной информационной базы

1 Логическая структура

Информационная БД содержит данные о типе сварки и сварных соединений, уровне качества сварного соединения, типах и видах дефектов, их размерах и виде СОП с конкретным типом эталонного отражателя.

Информация о полях таблиц в БД (п. 1.2; 1.3) содержится в таблицах справочника (п. 1.4).

2 Структура внутримашинной информационной БД

Структура разделов информационной БД состоит из функциональных блоков, которые соответствуют отдельной области используемых данных. Общая схема взаимосвязей функциональных блоков внутримашинной информационной БД приведена на рисунке В.1.



Рисунок В.1– Структура внутримашинной информационной БД

3 Характеристики данных каждого раздела

Имена соответствующих таблиц начальных данных в информационной БД совпадают с именами столбцов таблицы данных о сварном соединении. Например, отдельные данные о типе сварке собираются из таблицы «Тип сварки» и записываются в качестве атрибута welding в

таблицу «Сварное соединение». Возможные значения полей таблицы «Сварное соединение» указаны в соответствующих таблицах в справочнике п.1.4.

Таблица В.1 – Поля таблицы данных сварного соединения

| Имя столбца | Описание |
|--------------|--------------------------------------|
| welding | Тип сварки |
| weld_type | Тип сварного соединения |
| weld_quality | Уровень качества сварного соединения |

Пример:

Таблица В.2 – Сварное соединение

| welding | weld_type | weld_quality |
|-----------------|------------|--------------|
| Аргонно-дуговая | Продольное | А |
| Аргонно-дуговая | Поперечное | С |
| Электрошлаковая | Поперечное | В |

Также имена соответствующих таблиц начальных данных в информационной БД совпадают с именами столбцов таблицы данных об определенном дефекте. Например, отдельные данные о типе дефекта собираются из таблицы «Тип дефекта» и записываются в качестве атрибута def_type в таблицу «Дефект». Возможные значения полей таблицы «Дефект» указаны в соответствующих таблицах в справочнике п.1.4.

Таблица В.3 – Поля таблицы данных дефекта

| Имя столбца | Описание |
|-------------|----------------------|
| def_type | Тип дефекта |
| def_mode | Вид дефекта |
| defect | Условное обозначение |

Пример:

Таблица В.4 – Дефект

| def_type | def_mode | defect |
|---------------------------|------------|--------|
| Пора | Единичная | Aa |
| Неметаллические включения | Единичное | Ba |
| Несплавления | Межслойные | Cb |

4 Агрегированные и суммаризированные данные

Агрегированные и суммаризированные данные хранятся в двух таблицах соответствующих полученным из начальных данных таблицам «Сварное соединение» и «Дефект».

а) Первая таблицы выходных данных «Характеристика СОП» содержит данные об определенных параметрах отдельных видов СОП, Именованье происходит по следующей схеме: def_name___ ref_size_eq___ ref_mode.

Таблица В.5 – Поля таблицы данных характеристика СОП для каждого типа дефектов

| Имя столбца | Описание |
|---------------|--|
| defect | Наименование дефекта определённого типа и вида |
| ref_mode | Тип эквивалентного отражателя |
| ref_size_real | Реальные размеры отражателя |
| ref_size_eq | Эквивалентная площадь отражателя |

Таблица В.6 – Значения типа эквивалентного отражателя

| ref_mode |
|--------------------------|
| Плоскодонный отражатель |
| Цилиндрическое отверстие |
| Засечка |
| Ступенчатый образец |

Таблица В.7 – Характеристика СОП для каждого типа дефектов

| defect | ref_size_real | ref_size_eq | ref_mode |
|-----------------|--|------------------------|--------------------------|
| Aa | d=0,8 ld=2 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Плоскодонный отражатель |
| Ab | ld=2 два дефекта: L= 2,4 d=0,8 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Плоскодонный отражатель |
| Ac | ld=2 мм два дефекта: L= 2,4 d=0,8 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Плоскодонный отражатель |
| Ak | d =0,8 ld=2 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Ba | d =0,8 ld=2 li=4 два дефекта: L=0,8 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Bb | d=0,8 li=8 ld= 4 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Bc | d=0,8 li=4 ld= 2 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Bd ₁ | d=0,8 li=8 ld =2 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Bd ₂ | d=0,8 ld =2 | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Mw | d=0,8 ld= 2 мм | $S = 2 \text{ мм}^2$ | Цилиндрическое отверстие |
| Da ₁ | h=0,4 lt=0,4 k=30 | $S = 1,2 \text{ мм}^2$ | Засечка |

Продолжение таблицы В.7

| | | | |
|-----------------|--|--------------------------|--------------------------|
| Da ₂ | h=0,4 lt=0,4 k=30 | S = 1,2 мм ² | Засечка |
| Da ₃ | d=0,4 ld=2 мм | S = 0,16 мм ² | Цилиндрическое отверстие |
| Cb | d=0,4 ld=2 мм | S = 0,16 мм ² | Цилиндрическое отверстие |
| Cc ₁ | d=0,4 ld = 2 мм | S = 0,16 мм ² | Цилиндрическое отверстие |
| Cc ₂ | h=0,4 lt=0,4 k=30 | S = 1,2 мм ² | Засечка |
| E | d=0,4 ld=2 мм два направления относительно сварного шва | S = 0,16 мм ² | Цилиндрическое отверстие |
| Ec ₂ | h=0,4 lt=0,4 k=30 | S = 1,2 мм ² | Засечка |
| Fa | h=0,8 lt=0,8 k=30 | S = 2,4 мм ² | Засечка |
| Fb | stp=1,5 [8;11] | – | Ступенчатый образец |
| Fc | h=0,5 lt=0,8 k=30 | S = 1,5 мм ² | Засечка |
| Fd | stp=1,5 [8;11] | – | Ступенчатый образец |

б) Вторая таблица выходных данных содержит информацию о характеристике дефекта в определенном сварном шве «Журнал инспектора», Именование происходит по следующей схеме: def_type_def_mode_def_size.

Таблица В.8 – Поля таблицы данных характеристика дефекта

| Имя столбца | Описание |
|-------------|--|
| def_type | Тип дефекта |
| def_mode | Вид дефекта |
| def_size | Размер дефекта |
| defect | Наименование дефекта определённого типа и вида |

Таблица В.9 – Обозначения размерных параметров дефекта

| Размерный параметр | Обозначение |
|--|-------------|
| Расстояние между соседними дефектами, мм | L |
| Диаметр дефекта, мм | d |
| Высота дефекта, мм | H |
| Толщина стенки трубы, мм | S |
| Суммарная максимально допустимая протяженность дефекта, мм | Д |
| Глубина залегания дефекта, мм | c |

Продолжение таблицы В.9

| | |
|-------------------------------|----|
| Длина дефекта вдоль шва, мм | li |
| Длина дефекта поперек шва, мм | lt |
| Глубина залегания дефекта, мм | ld |

Таблица В.10 – Журнал инспектора: Характеристика дефекта

| defect | def_size | | |
|--|---|---|---|
| | A | B | C |
| Поры единичные | L=2,4 d; h; li; lt = 0,8 Д = 30 | L=4,8 d; h; li; lt = 1,6 или L=10,4 d; h; li; lt = 2 Д=50 | L=4,8 d; h; li; lt = 1,6 или L=10,4 d; h; li; lt = 2 Д=50 |
| Поры в цепочке | d; h; lt = 0,8 li=8 Д=30 | d; h; lt =1,2 li=8 Д=30 | d; h; lt = 1,6 li=16 Д=50 |
| Поры в скоплении | d; h = 0,8 li; lt = 4 Д=25 | d; h = 0,8 li; lt = 4 Д=30 | |
| Поры канальные | L=0,8 d; h; li; lt = 0,5 | h, lt = 0,8 li=4 Д=25 | h, lt = 0,8 li=8 Д=30 |
| Неметаллические включения единичные | h=0,8 lt=2,5 li=4 Д=30 | h=0,8 lt=3 li=4 Д=30 | |
| Неметаллические включения в цепочке | d; h; lt = 0,8 li=8 Д=30 | d; h; lt = 0,8 li=16 Д=50 | |
| Неметаллические включения в скоплении | d; h = 0,8 li; lt = 4 Д=25 | d; h = 0,8 li; lt = 4 Д=30 | |
| Неметаллические включения односторонние удлиненные | h=0,8 li=8 Д=30 | h=0,8 li=16 Д=50 | |
| Неметаллические включения двухсторонние удлиненные | L=1 d; h; li; lt = 0,5 | h=0,8 li=8 Д=30 (с обеих сторон шва) | h=0,8 li=8 Д=50 (с обеих сторон шва) |
| Металлические вольфрамовые и других материалов | d; h; lt = 0,8 li=3, L=50 (два включения на 300) | d; h; lt = 0,8 li=6, L=50 (четыре включения на 300) | |
| Непровары в корне шва | h=0,4 li=8 Д=25 | h=0,4 li=8 Д=30 | h=0,4 li=16 Д=50 |
| Непровары в корне шва из-за смещения кромок | li=16 Д=50 | i=16 Д=75 | |
| Непровары внутренние при двухсторонней сварке | h=0,4 li=16 Д=25 | h=0,8 li=16 Д=25 | |
| Несплавления межслойные | li=16 Д=25 | li=16 Д=30 | |

Продолжение таблицы В.10

| | | |
|--|---------------------------|--------------------------|
| Несплавления по разделке кромок | L=1 d; h; li; lt = 0,5 | h=0,4 li=8 Д=15 |
| Несплавления по разделке кромок с выходом на поверхность | L=1 d; h; li; lt = 0,5 | h=0,4 li=8 Д=15 |
| Трещины | Дефекты не допускаются | |
| Дефекты формы шва, вогнутость | h=0,8 li=8 Д= 50 | h=1,6 li=16 Д= 100 |
| Дефекты формы шва, превышение проплавления | h=3 li=4 Д=30 | h=5 li=8 Д= 50 |
| Дефекты формы шва, подрез | h=0,5 li=150 | |
| Дефекты формы шва, смещение кромок | h=1,6 | |

5 Словари

а) Справочник – Сварное соединение

Содержание полей данных «Сварного соединения» (Таблицы В.11-В.13).

Таблица В.11 – Вид сварки

| |
|-----------------|
| welding |
| Аргонно-дуговая |
| Электрошлаковая |
| Под флюсом |

Таблица В.12 – Тип сварного соединения

| |
|------------------|
| weld_type |
| Поперечное |
| Продольное |

Таблица В.13 – Уровень качества сварного соединения

| |
|---------------------|
| weld_quality |
| A |
| C |
| B |

б) Справочник – тип дефекта

Содержание полей данных «Дефекта» (Таблицы В.14, В.15).

Таблица В.14 – Тип дефекта

| def_type | Обозначение |
|---------------------------|-------------|
| Поры | A |
| Неметаллические включения | B |
| Металлические включения | M |
| Непровары | D |
| Несплавления | C |
| Трещины | E |
| Дефект формы шва | F |

Таблица В.15 – Вид дефекта

| def_mode | Обозначение |
|-------------------------------------|----------------|
| Единичные | a |
| Цепочки | b |
| Скопления | c |
| Канальные, «червеобразные» | k |
| Односторонние удлиненные | d ₁ |
| Двухсторонние удлиненные | d ₂ |
| Вольфрамовые включения и металлов | w |
| В корне шва | a ₁ |
| В корне шва из-за смещения кромок | a ₂ |
| Внутренние при двухсторонней сварке | a ₃ |
| Межслойный | b |
| По разделке кромок | c ₁ |
| С выходом на поверхность | c ₂ |
| Вогнутость корня шва | Fa |
| Превышение проплавления | Fb |
| Подрезы | Fc |
| Смещение кромок | Fd |

6 Физическая структура

Данные на машинных носителях располагаются следующим образом: информационная БД стандартизированных дефектов сварных соединений контейнеров с ОЯТ управляется средствами программы FileMaker Pro, которая располагается на управляющем компьютере. Она полноценно поддерживается операционными системами Windows XP, Windows Vista и Mac OS X. Решения на базе FileMaker Pro содержат минимум программного кода. Процесс работы с информационной БД в FileMaker Pro сводится в основном к взаимодействию с графическим интерфейсом программы. Все данные, содержащиеся и используемые при работе с БД сохраняются локально в памяти управляющего компьютера.

7 Организация ведения информационной БД

а) Создание базы

Структура базы создается автоматически при помощи ПО программы FileMaker Pro при установке. Справочники БД заполняются автоматически.

б) Обслуживание базы

Средством для заполнения базы данных является ПО FileMaker Pro.

в) Очистка базы

Очистка базы от устаревших записей для улучшения производительности и оптимизации использования пространства памяти данных осуществляется оператором. Периодичность поиска данных, подлежащих удалению и очистка базы данных, устанавливается согласно регламенту хранения данных контроля.

г) Резервное копирование базы

Резервное копирование базы производится встроенными средствами FileMaker Pro.

д) Обеспечение средств защиты базы от разрушения и несанкционированного доступа

В качестве средств защиты базы от несанкционированного доступа используются штатные средства FileMaker Pro, такие как система авторизации пользователей, система разграничения прав, а также антивирусные программы, установленные на управляющий компьютер.

8 Описание организации немашинной информационной базы

Немашинная структура информационной базы отражает перечень документов и других информационных сообщений, использование которых предусмотрено в информационной БД стандартизированных дефектов сварных соединений контейнеров с ОЯТ. Приводится расположение данных взятых из нормативных документов в структуре, разрабатываемой БД.

9 Логическая структура

В состав информационной БД стандартизированных дефектов сварных соединений контейнеров с ОЯТ входит информация о стандартизированных типах сварных соединений, видах сварки, уровнях качества сварных соединений, типах и видах дефектов сварных соединений. Все эти данные сохранены в электронных словарях, которые используются при работе и создании информационной БД дефектов (п. 1.4). Выходные агрегированные и суммаризированные данные учитывают размеры стандартизированных дефектов и

соответствующих эквивалентных отражателей в рамках описания СОП, которые соответствуют нормативным документам.

10 Физическая структура

Источниками начальных данных для ввода в информационной БД являются внешние бумажные документы, которые можно разделить на следующие группы:

- государственные стандарты;
- отраслевые стандарты;
- межгосударственные стандарты.

Перечень основных внешних документов системы представлен в таблице В.16.

Таблица В.16 – Перечень основных внешних документов

| № | Документ | Использование данных |
|---|--|---|
| 1 | ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий | Термины и определения для формирования документов |
| 2 | ГОСТ Р ИСО 5817-2009. Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества | Определение уровней качества сварных соединений |
| 3 | ОСТ 95 10440-2002. Оборудование для работы с радиоактивными средами. Сварные соединения. Типы, конструктивные элементы и размеры | Определение типов сварных соединения |
| 4 | ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры | Определение вида сварки и типов сварных соединений |
| 5 | ГОСТ 14782-86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые | Определение характеристик дефектов сварных соединений и их размеров |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Конструкторская документация системы ультразвукового томографического контроля

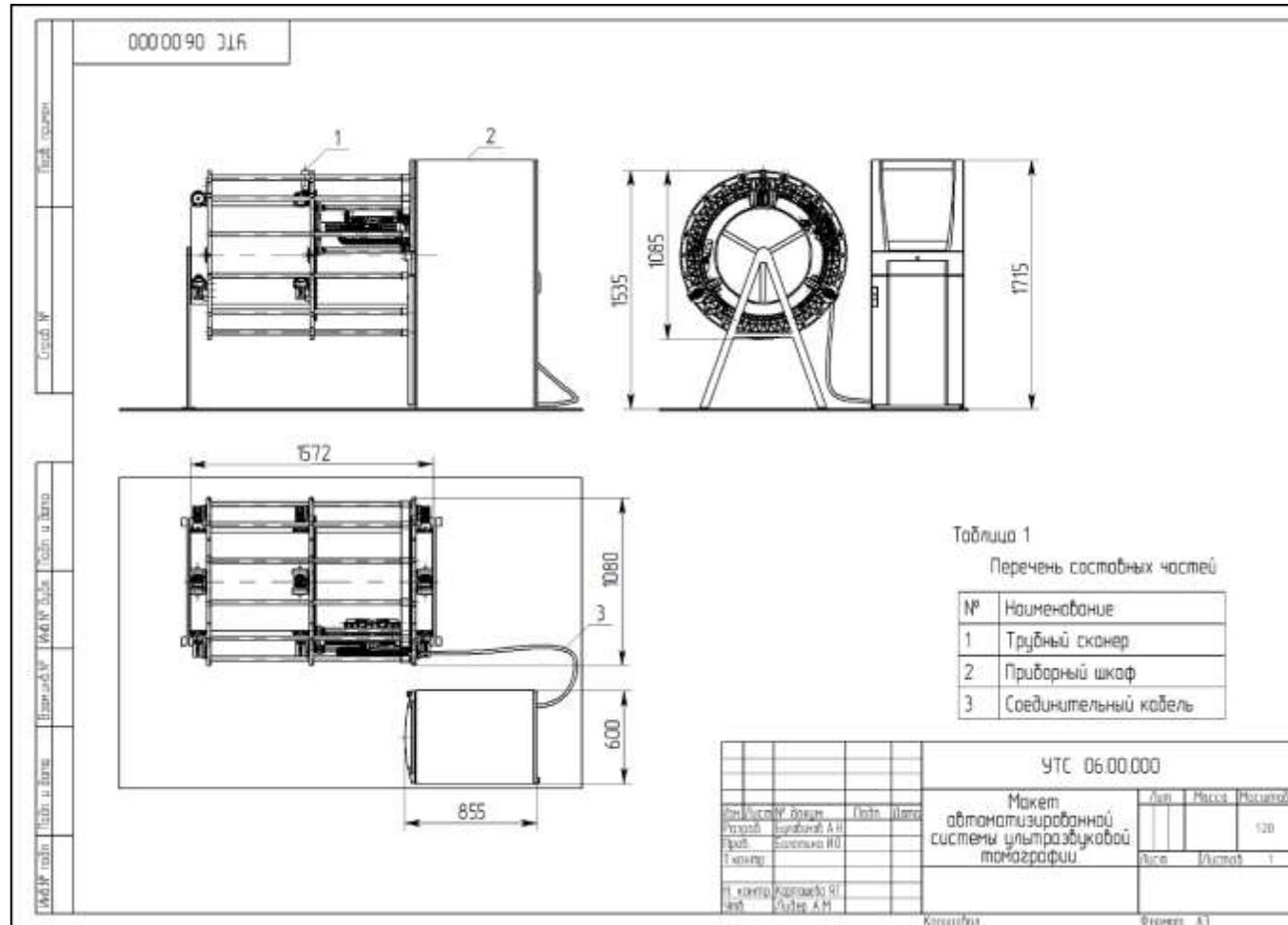
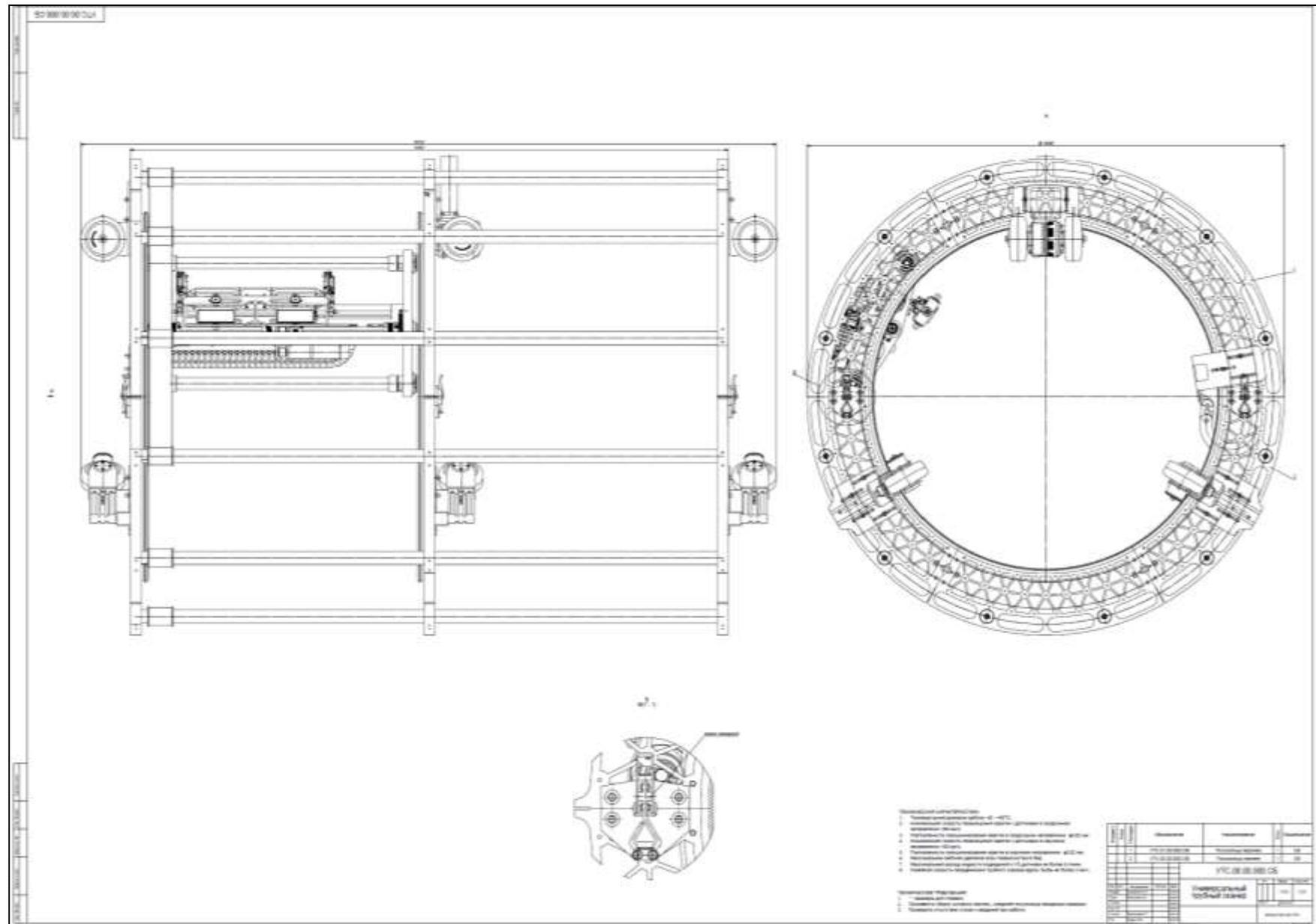


Рисунок Г.1 – Макет автоматизированной системы ультразвукового томографического контроля



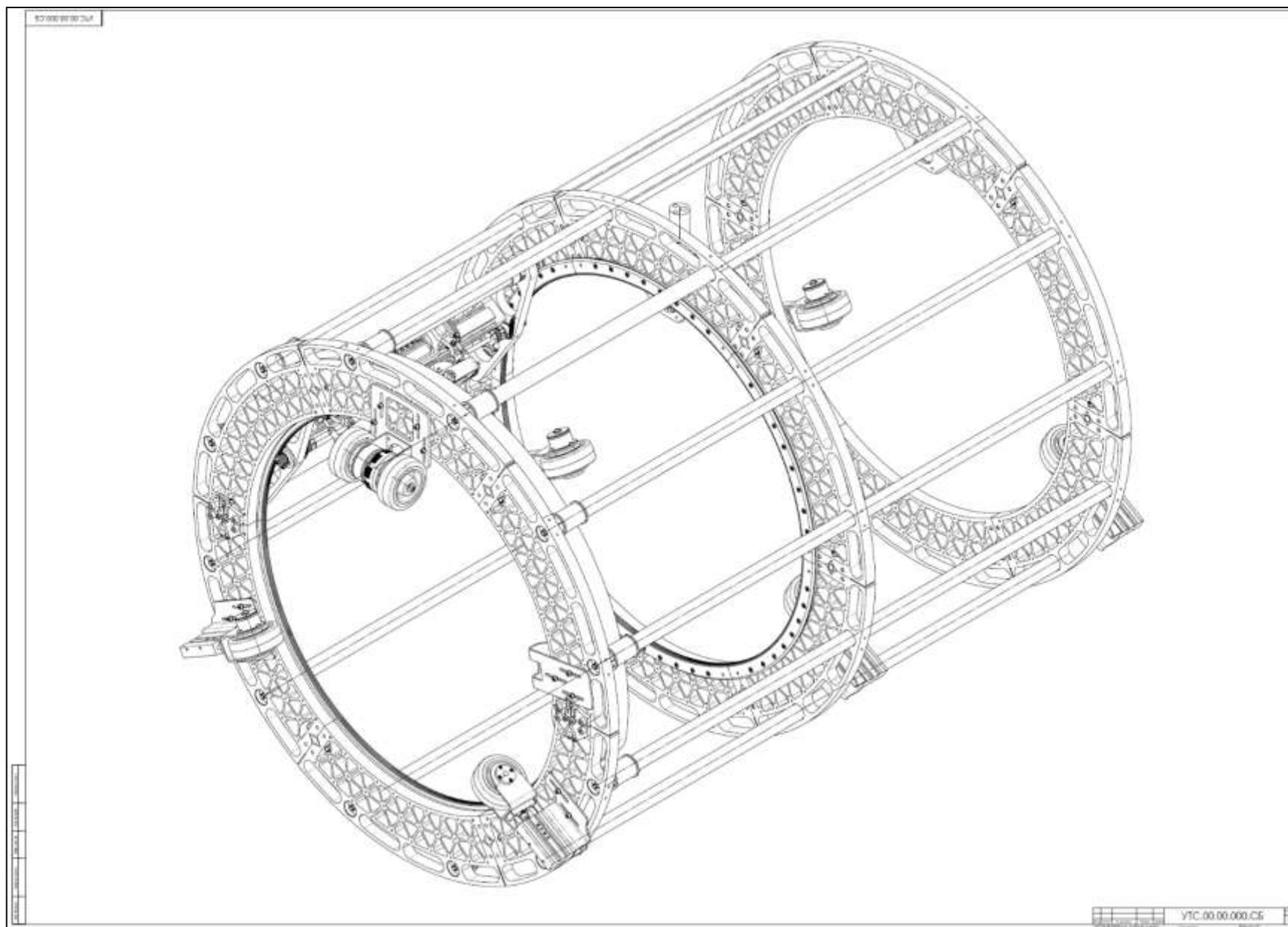


Рисунок Г.3 – Сборочный чертеж сканирующего устройства

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Акт внедрения в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ФТИ ТПУ
 О.Ю. Долматов
 17 сентября 2017 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Салчак Яны Алексеевны

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой ФЭУ, к.ф.-м.н., доцент Долматов О.Ю., члены комиссии: доцент кафедры ФЭУ, к.т.н., Демянюк Д.Г., доцент кафедры ФЭУ, к.т.н., Седнев Д.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Салчак Я.А. «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, используются в 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

Д.Г. Демянюк

Д.А. Седнев

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Акт внедрения в производственный процесс



ОАО «СибАтомСервис», 107140 г. Москва, ул. Верхова Крайневского в. 10, корп. 7А.
Тел. (823) 54-58-43, e-mail: srfb@sibatomservice.ru

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Салчак Яны Алексеевны

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Салчак Я.А. «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА», представленной 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 ОАО «СибАтомСервис».

Главный инженер



С.А. Заболотнов