

*АТТЕСТАЦИЯ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
КОНТРОЛЯ С ПОЛНЫМ ЦИКЛОМ АВТОМАТИЗАЦИИ*

*А.Е. Базулин, С.А. Коколев, Д.С. Тихонов*

*ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия*

## **1 Введение**

С 1990-х годов в ООО «НПЦ «ЭХО+» ведутся работы по разработке, изготовлению и эксплуатации систем автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных серии АВГУР, в которых визуализация изображений несплошностей выполняется по алгоритму проекции в спектральном пространстве, разновидностью метода синтезированной фокусированной апертуры FT-SAFT. Дальнейшим развитием систем серии АВГУР была аттестованная в 2012 г. система АУЗК с использованием технологии антенных решеток АВГУР-АРТ. В этом приборе объединены возможности когерентной визуализации с синтезированной апертурой как при механическом, так и при электронном сканировании с применением метода C-SAFT — цифровой фокусировки антенны (ЦФА). Применяя эту технологию с возможностями точного механического сканирования, удастся преодолеть пространственные ограничения применения антенных решёток и добиться существенного повышения качества изображений.

Разработка и применение приборов АУЗК с когерентной обработкой данных требует специального методического и программного обеспечения, связанного с появляющимися дополнительными возможностями и особенностями выполнения АУЗК. Использование таких приборов дает возможность перейти от традиционной ультразвуковой дефектоскопии к ультразвуковой дефектометрии.

В докладе представлены сведения о разработке и опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) системы автоматизированного ультразвукового контроля с полным циклом автоматизации на базе фазированных антенных решеток (далее – Система) совместно с методикой ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений (СС) обечаек парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М.

Приведены сведения об алгоритмах автоматизации и результатах их работы на реальных сварных соединениях, содержащих допустимые несплошности и на испытательных образцах, содержащих недопустимые несплошности.

На основании анализа результатов, полученных при выполнении программы опытно-промышленной эксплуатации, установлено, что применение системы и методики для эксплуатационного контроля оборудования и трубопроводов АЭС обосновано.

## **2 Состав Системы**

В состав Системы входят следующие основные элементы, разработанные и производимые ООО «НПЦ «ЭХО+»:

- многоканальный ультразвуковой дефектоскоп АВГУР-АРТ;
- антенные решетки и призмы;
- автоматизированное сканирующее устройство;
- программное обеспечение (ПО) для регистрации данных;
- ПО для хранения, обработки данных и выдачи заключения по результатам контроля

## **3 Этапы и алгоритмы автоматизации**

Автоматизированы следующие этапы проведения контроля:

- настройка и тестирование аппаратуры;
- процесс сканирования и слежения за качеством акустического контакта;
- обработка данных;
- выявление и определение характеристик несплошностей;
- формирование заключения по результатам контроля.

### **3.1 Авторизованный доступ**

В программе регистрации данных предусмотрен авторизованный доступ, предусматривающий выбор пользователя и ввод пароля для проведения процедуры контроля. Пример диалога выбора пользователя представлен на рисунке 1.

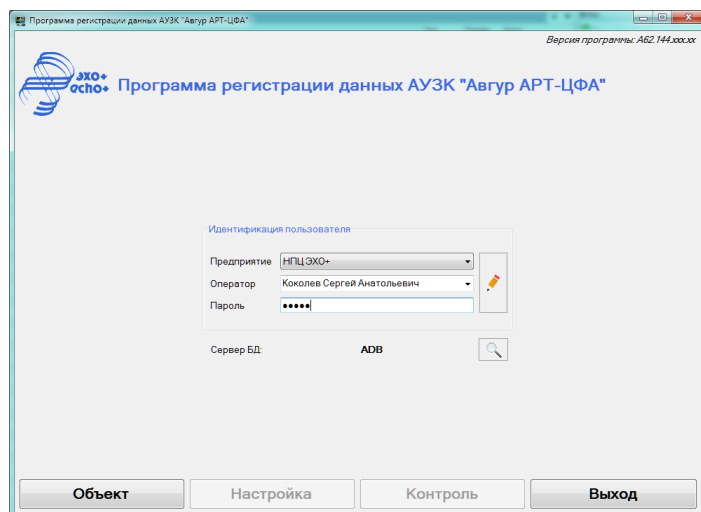


Рисунок 1 – Диалог выбора пользователя

Имя пользователя, проводившего контроль, и его данные автоматически подставляются в соответствующие поля заключения по результатам контроля.

### 3.2 Настройка оборудования

В базе данных хранятся записи с методическими параметрами, в которых задаются все параметры оборудования и алгоритмов, необходимые для проведения контроля. Затем в программе регистрации данных, перед началом проведения контроля, выбирается ранее заданные методические параметры и все параметры автоматически загружаются в текущий сеанс контроля.

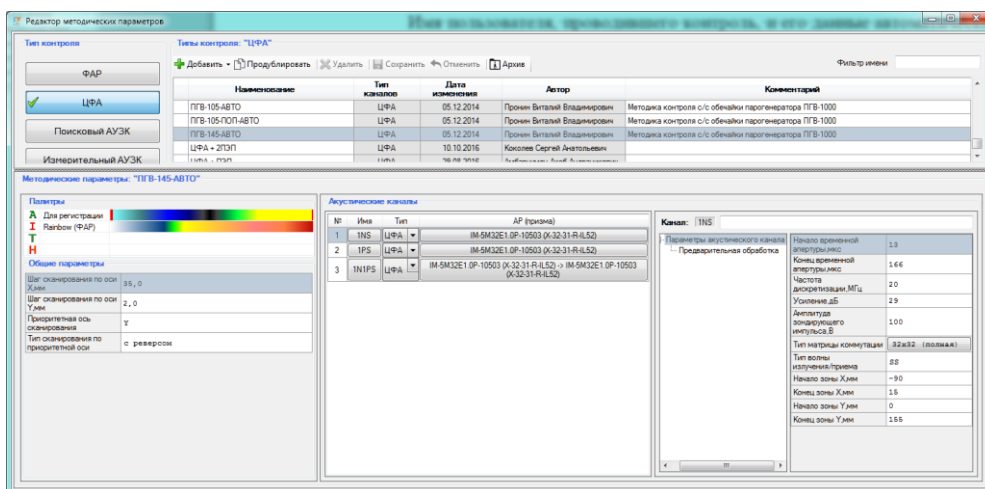


Рисунок 2 – Диалог задания методических параметров

### 3.3 Проверка оборудования перед началом контроля

Для исключения возможности проведения контроля с неисправным оборудованием в программе регистрации данных предусмотрена процедура

проверки оборудования (ультразвукового модуля и модуля управления сканером). При выявлении проблем с оборудованием программа не позволит оператору перейти на страницу настройки оборудования. Пример диалога проверки оборудования представлен на рисунке 2.

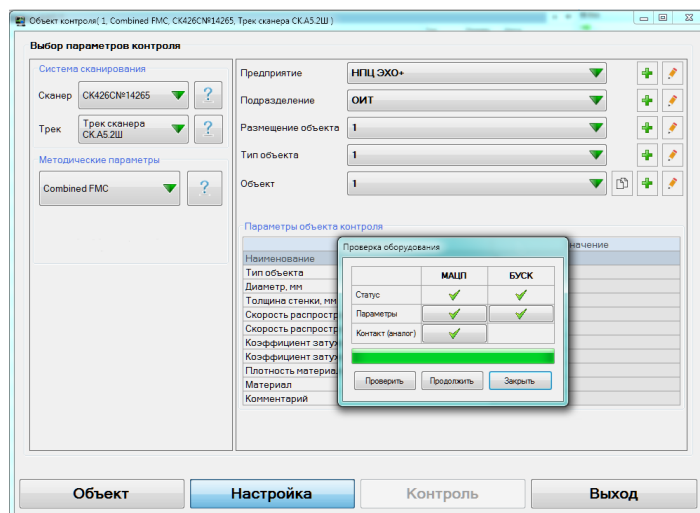


Рисунок 3 – Диалог проверки оборудования

### 3.4 Проверка качества акустического контакта

Алгоритм проверки качества акустического контакта призмы с поверхностью объекта контроля заключается в восстановлении изображения донной поверхности и автоматическом слежении за амплитудой донного сигнала. В процессе проведения контроля зеленым цветом помечаются участки с удовлетворительным качеством акустического контакта, красным – с неудовлетворительным. Алгоритм применим если объект контроля, непосредственно под контактной площадкой призмы, имеет гладкую донную поверхность без конусных переходов и прочих неровностей.

Пример индикации качества акустического контакта в процессе проведения контроля представлен на рисунке 4.

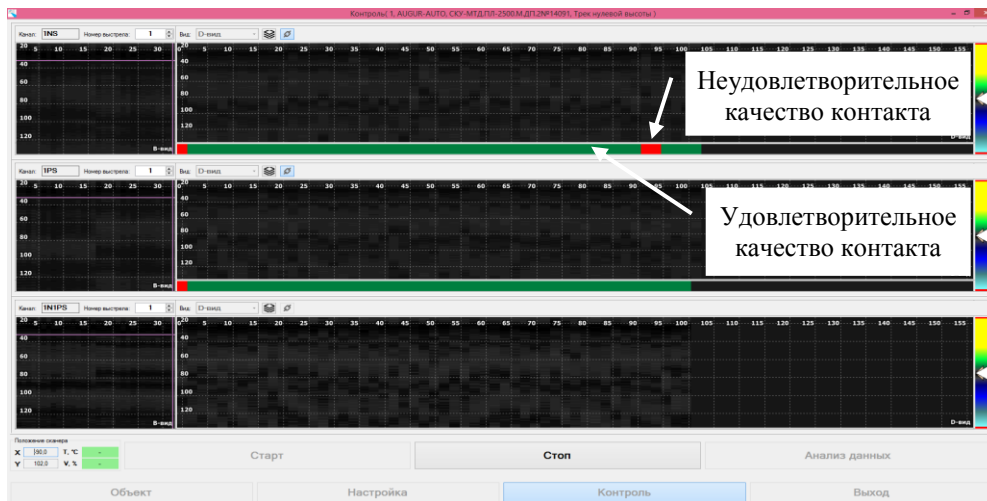


Рисунок 4 – Индикация качества акустического контакта

В дальнейшем, в процессе обработки зарегистрированных данных, по вышеописанному алгоритму, формируется и сохраняется карта контакта, на которой цветом обозначены зоны с неудовлетворительным качеством акустического контакта. Подобная карта является приложением к заключению по результатам контроля.

Пример двумерной карты контакта представлен на рисунке 5.

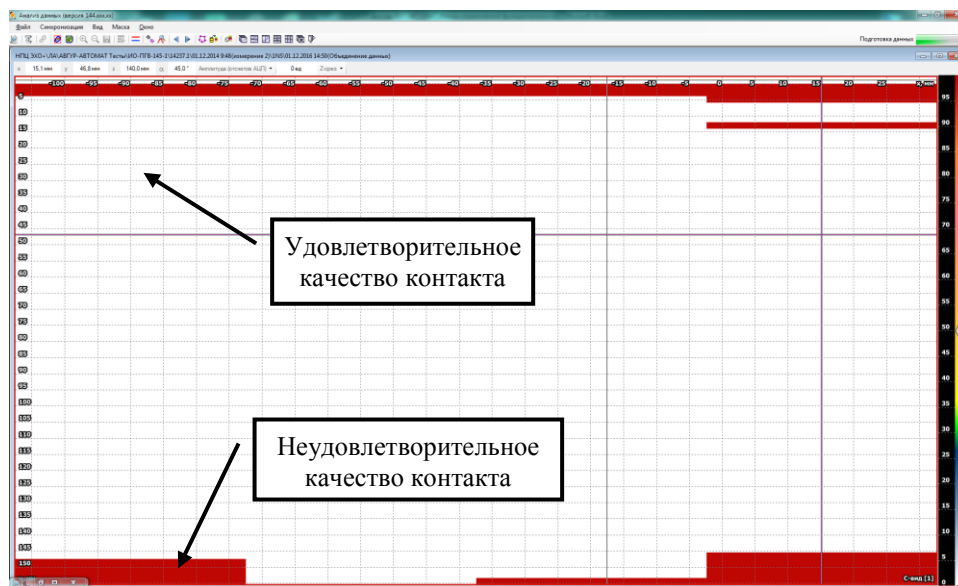


Рисунок 5 – Двумерная карта качества акустического контакта

### 3.5 Предобработка данных

Зарегистрированные в процессе контроля данные обрабатываются методом ЦФА. Если при проведении контроля использовалось несколько

антенных решеток, то обработка применяется к данным, полученным каждой антенной решетки, последовательно.

Затем ко всем полученным изображениям последовательно применяется процедура автоматизированного поиска областей локализации несплошностей (ОЛН).

### **3.6 Автоматизированный поиск областей локализации несплошностей**

В таблице 1 представлено описание основных этапов алгоритма автоматизированного поиска ОЛН.

Таблица 1 – Основные этапы алгоритма автоматизированного поиска ОЛН

№	Название	Описание
1	Отсечка шума	Предназначена для удаления низкоамплитудного шума на изображении. Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке ниже заданного уровня ниже заданного, то амплитуда приравнивается нулю. Уровень отсечки зависит от медианы и дисперсии исходного изображения.
2	Фильтрация изображения	Предназначена для удаления высокоамплитудного шума на изображении. Производится путем сглаживания изображения эллиптическим фильтром. Длины полуосей и угол поворота эллипса задаются в параметрах алгоритма
3	Поиск локальных максимумов	В каждой плоскости фильтрованного изображения, полученного на предыдущем этапе, выполняется поиск локальных максимумов по маске в виде эллипса, которые могут соответствовать ОЛН.
4	Поиск контуров	Для каждого локального максимума послойно рассчитываются размеры контура локализации несплошности по Z и по X. Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке больше заданного уровня отсечки от локального максимума (по умолчанию – минус 6 дБ), то точка включается в контур.
5	Объединение контуров	Выполняется объединение контуров в каждой плоскости изображения, если расстояние между ними меньше заданного.
6	Удаление малых контуров.	Удаляются контура, размер которых менее 50% размера элемента разрешения (размер точечного отражателя).

7	Поиск 3D-контуров	Производится объединение контуров в соседних плоскостях в 3D-контур если расстояние между их максимумами меньше заданной величины, пропорциональной размерам элемента разрешения.
8	Объединение 3D-контуров	3D-контур объединяются, если расстояние между ними меньше заданного значения, пропорционально размерам элемента разрешения.
9	Удаление малых 3D-контуров	3D-контур удаляется, если его размеры меньше заданного значения.
10	Определение амплитуды и условных размеров дефекта	Максимум амплитуды определяется по исходному, неотфильтрованному изображению в области, ограниченной 3D-контуром
11	Удаление 3D-контуров несплошностей с низкой амплитудой	Удаляются 3D-контур несплошностей с амплитудой ниже контрольного уровня.
12	Определение типа несплошностей	Определяется превышение амплитудой несплошности контрольного и браковочного уровней и ее положение по толщине объекта контроля (наружная, внутренняя, подповерхностная). Также определяется является ли несплошность объемной либо плоскостной.
13	Сохранение списка найденных 3D-контуров несплошностей в базу данных	Все оставшиеся в результате работы алгоритма 3D-контур несплошностей сохраняются в базу данных для текущего объекта контроля.

В результате автоматического поиска ОЛН определяются следующие параметры для каждой несплошности:

- превышение браковочного уровня в дБ;
- расположение в объекте контроля по осям X, Y, Z в мм;
- условная протяженность в мм;
- протяженность по осям X, Y, Z в мм.
- тип несплошности.

После завершения поиска автоматически формируется заключение по результатам контроля. Данные УЗК в виде изображений и протокол работы программы автоматического поиска ОЛН могут быть использованы как приложение к заключению.

### **3.6.1 Изменения в алгоритме поиска ОЛН по результатам опытно-промышленной эксплуатации**

По результатам ОПЭ Системы, рассмотренных в разделе 4, в алгоритм автоматизированного поиска ОЛН были внесены изменения.

При обработке данных, полученных по нескольким схемам контроля, установлена необходимость ввести фильтрацию данных, из области реверберационных шумов. Эта область обозначается рамкой, привязанной к координате передней грани призмы, и, при ее в область контроля, она исключается из анализа данных. На рисунке 6 схематично представлены зоны с реверберационных шумом для одной из типов призм.

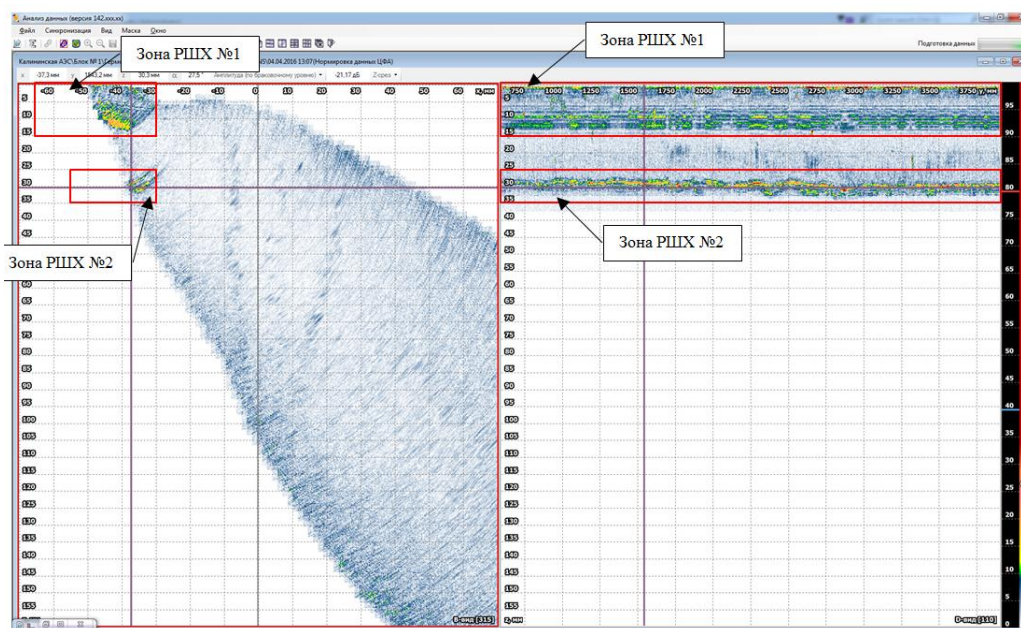
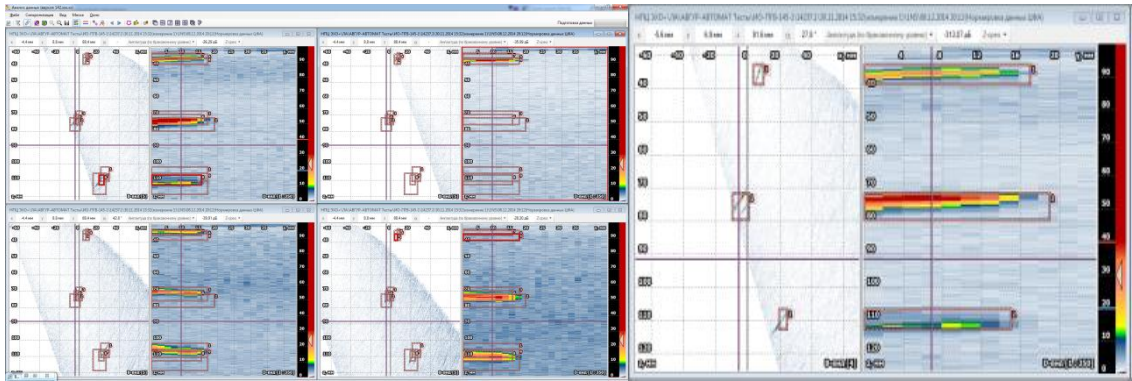


Рисунок 6 – Фильтрация зоны реверберационных шумов

Одна и та же несплошность может быть выявлена при контроле с различных сторон сварного соединения, а также при изменении координаты призмы относительно центра СС. В алгоритм автоматизации внесено новое правило: при выявлении несплошностей по разным схемам контроля, в случае если перекрытие рамок несплошностей не превышает заданного значения – из найденных рамок несплошностей по разным схемам остается та, в которой амплитуда изображения наибольшая. Если амплитуды одинаковые, то остается та рамка, у которой протяженность больше.

Пример работы этого правила приведен на рисунке 7. Три отверстия бокового сверления выявляются по четырем схемам контроля при разных расстояниях от призмы до оси сварного соединения, в результате каждой несплошности соответствует несколько рамок (слева). После применения правила объединения остается одна рамка для каждого из отверстий.





Рамки несплошностей по четырем  
схемам контроля

Результат объединения (каждой  
несплошности соответствует одна

Рисунок 7 – Пример работы правила объединения ОЛН, полученных по разным  
схемам контроля

#### 4 Испытание и опытно-промышленная эксплуатация Системы

В 2014 году ООО «НПЦ «ЭХО+» разработан документ «Автоматизированный ультразвуковой контроль кольцевых сварных соединений обечаек парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М с применением системы автоматизированного контроля с полным циклом автоматизации. Методика» № МТ 1.2.1.15.001.1001-2014 (далее – Методика). Методика прошла приёмочные испытания в конце 2014 года и утверждена заместителем Генерального директора – директором по производству и эксплуатации АЭС АО «Концерн Росэнергоатом».

Для проведения ОПЭ Системы, на основании рекомендаций Ростехнадзора, изложенных в письме от 02.02.2015 № 05-04-08/154, и Указания заместителя Генерального директора – директора по производству и эксплуатации АЭС АО «Концерн Росэнергоатом» № 9/245-У от 24.02.2015 по организации работ по опытно-промышленной эксплуатации Системы и Методики, была разработана и утверждена программа ОПЭ.

На основании результатов всех проведенных работ, совместно с Калининской АЭС, подготовлен отчет, в котором анализируется и подтверждается применимость Системы и Методики для проведения эксплуатационного контроля сварных соединений в реальных условиях ППР на АЭС.

В процессе выполнения программ испытаний и опытно-промышленной эксплуатации Системы проводился контроль испытательных образцов и реальных

сварных соединений. При проведения контроля использовалось следующее оборудование:

- многоканальный дефектоскоп ультразвуковой ДУМ АВГУР-АРТ-64-СЕА;
- сканирующее устройство СКУ-МТД.ПЛ-2500.М.ДП.2;
- антенные решетки IMASONIC IM-5M32E1P (центральная частота – 5 МГц, 32 элемента, шаг – 1 мм.).

Фотография сканирующего устройства в процессе проведения контроля представлена на рисунке Рисунок 8.



Рисунок 8 – Фото сканирующего устройства в процессе контроля

#### **4.1 Основные этапы работ по программе ОПЭ**

Местом проведения работ по ОПЭ являлся филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская атомная станция».

Целью выполнения работ по ОПЭ являлось экспериментальное подтверждение возможности применения Системы (совместно со специализированными методиками) для эксплуатационного контроля оборудования и трубопроводов АЭС АО «Концерн Росэнергоатом».

Для проведения контроля в рамках ОПЭ выполнен полный перечень работ в соответствии с порядком, описанном в программе ОПЭ.

АУЗК проводился в соответствии с методическими положениями Методики, при выполнении АУЗК использовались технические средства контроля в соответствии с требованиями Методики.

Нормы оценки качества проконтролированных АУЗК соответствовали ПНАЭ Г-7-010-89, в заключениях по результатам контроля приведены координаты и амплитуды выявленных несплошностей.

В дополнение с АУЗК проводился ручной ультразвуковой контроль (РУЗК) в соответствии с ПНАЭ Г-030-89, ПНАЭ Г-010-91, НП-084-15. Контроль проводился персоналом, аттестованным в соответствии с ПНАЭ Г-7-010 и ПР 1.3.3.99.0010 с правом выдачи заключений.

По результатам РУЗК и АУЗК в проконтролированных сварных соединениях не выявлено фиксируемых по действующим нормам оценки качества несплошностей, в этой связи, не было необходимости проведения ремонта, металлография проконтролированных СС не выполнялась.

При проведении РУЗК и АУЗК одного сварного соединения на повышенной на 12 дБ чувствительности выявлено достаточное число (более 15) несплошностей.

По результатам проведенных сопоставлений полученных параметров несплошностей и на основе анализа использования Системы в реальных условиях ППР на АЭС была подтверждена возможность использования Системы и Методики при эксплуатационном контроле на АЭС.

#### **4.2 Контроль испытательного образца ИО-ПГВ-145-1**

Для проведения испытаний САУЗК были разработаны и изготовлены испытательные образцы ИО-ПГВ-145-1, ИО-ПГВ-105-1, толщиной 145 и 105 мм. соответственно.

Дефектограмма испытательного образца ИО-ПГВ-145-1 представлена на рисунке 9.

В образце выполнено:

- три отверстия бокового сверления (12, 13, 16);
- три придонных паза (2, 4, 15);
- один висячий паз (10).

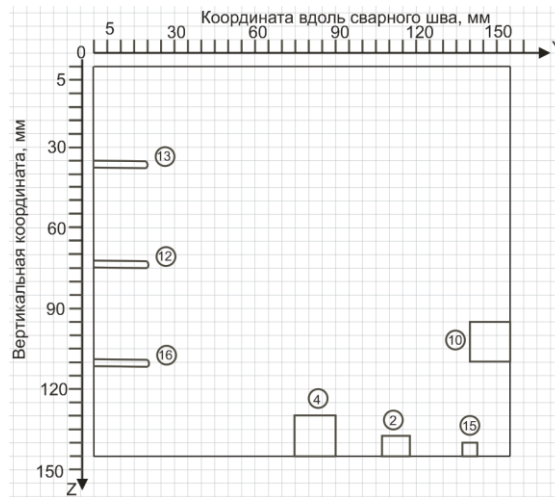


Рисунок 9 – Дефектограмма испытательного образца ИО-ПГВ-145-1

На рисунке 10 показано изображение с автоматически выявленными несплошностями в образце ИО-ПГВ-145-1.

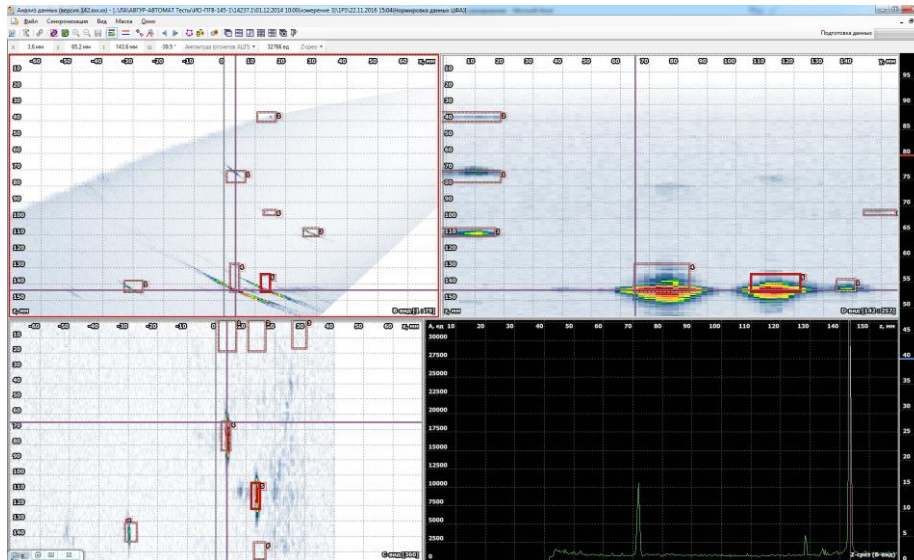


Рисунок 10 – Примеры выявления несплошностей в СС обечайки парогенератора

В таблице 2 представлены параметры несплошностей, обнаруженных при контроле образца ИО-ПГВ-145-1 с использованием САУЗК. В таблице представлены следующие параметры несплошностей:

- порядковый номер;
- координаты начала, конца и протяженность по осям X, Y и Z в мм.;
- максимальная амплитуда в дБ;
- условная длина и высота в мм.;
- информация о типе несплошности

Таблица 2 – Несплошности, выявленные в образце ИО-ПГВ-145-1

№	Ун, мм	Ук, мм	Лу, мм	Хн, мм	Хк, мм	Лх, мм	Зн, мм	Зк, мм	Лз, мм	Ампл., дБ	Лусл, мм	Нусл, мм	Комментарий
1	-1	19	20	1	6	5	71	77	6	-0,6	12	2	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
2	-1	19	20	11	16	5	35	40	5	-1,6	10	1	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
3	-1	17	18	26	30	4	106	110	4	-5	-	-	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
4	66	84	18	2	4	2	128	144	16	1,9	28	10	Тип ПЛ, Уровень БР, Положение ВН
5	106	122	16	12	14	2	134	144	10	1,9	20	8	Тип ПЛ, Уровень БР, Положение ВН
6	136	140	4	-33	-28	5	134	144	10	-10	-	-	Тип ОБ, Положение ВН
7	145	155	10	13	16	3	95	97	2	-16	-	-	Тип ПЛ, Положение ППОВ

По результатам проведения контроля испытательных образцов с использованием САУЗК были обнаружены все заложенные в них искусственные отражатели.

### 4.3 Контроль СС обечайки парогенератора ПГВ-1000М

В рамках выполнения работ по программе ОПЭ Системы был проведен контроль нескольких СС обечайек парогенераторов на Калининской АЭС.

На рисунке 11 показаны примеры изображений с автоматически выявленными несплошностями в СС обечайки парогенератора ПГВ-1000М при разных расстояниях от передней грани призмы до центра СС. Контроль проводился при повышенной на 12 дБ чувствительности.

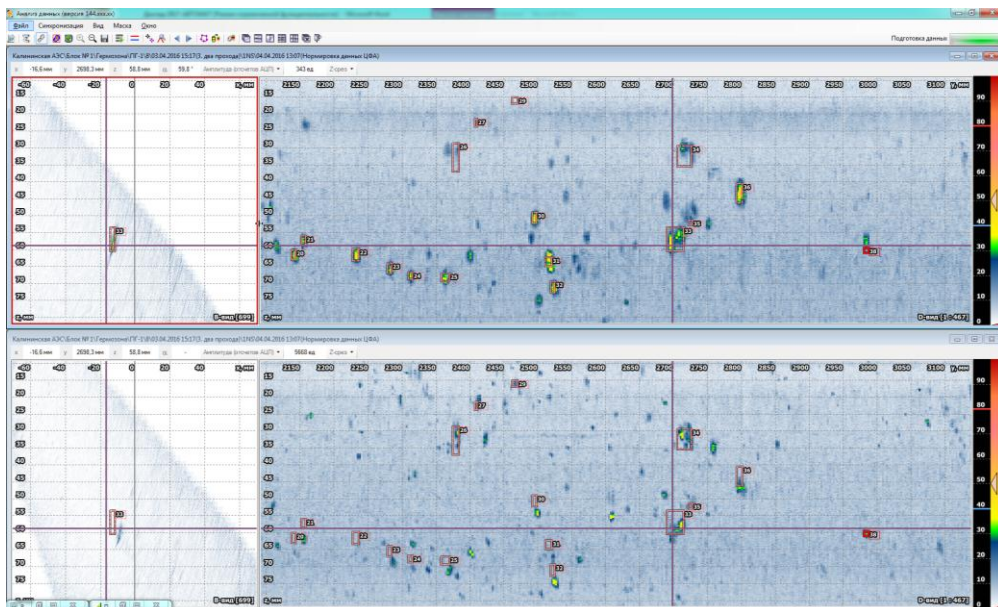


Рисунок 11 – Примеры выявления несплошностей в СС обечайки парогенератора

В таблице 3 приведен фрагмент списка несплошностей, выявленных в СС обечайки парогенератора ПГВ-1000М.

Таблица 3 – Несплошности, выявленные СС обечайки парогенератора ПГВ-1000М

№	Ун, мм	Ук, мм	Лу, мм	Хн, мм	Хк, мм	Лх, мм	Зн, мм	Зк, мм	Лз, мм	Ампл., дБ	Лусл, мм	Нусл, мм	Комментарий
26	2 376	2 385	9	-27	-22	5	28	37	8	-4	3	2	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
27	2 409	2 412	3	-10	-8	1	21	24	2	-3	3	1	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
28	2 421	2 433	12	11	15	4	132	136	3	-4	3	1	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
29	2 463	2 472	9	-42	-40	1	15	17	1	0	6	-	Тип ОБ, Уровень БР, Положение ППОВ
30	2 493	2 499	6	-13	-10	2	49	52	3	-4	3	1	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ
31	2 513	2 522	9	-10	-9	0	62	65	2	-3	6	5	Тип ОБ, Уровень КТ, Положение ППОВ

На рисунке 12 представлен увеличенный фрагмент изображений, полученных при проведении контроля. Изображения получены при разных расстояниях от передней грани призмы до центра СС. На каждом из изображений присутствуют индикации, соответствующие одним и тем же несплошностям. В результате работы алгоритма автоматизированного поиска для каждого изображения в отдельности, были обнаружены ОЛН, которые в результате были объединены. В результате, в данной области контроля было зафиксировано четыре несплошности.

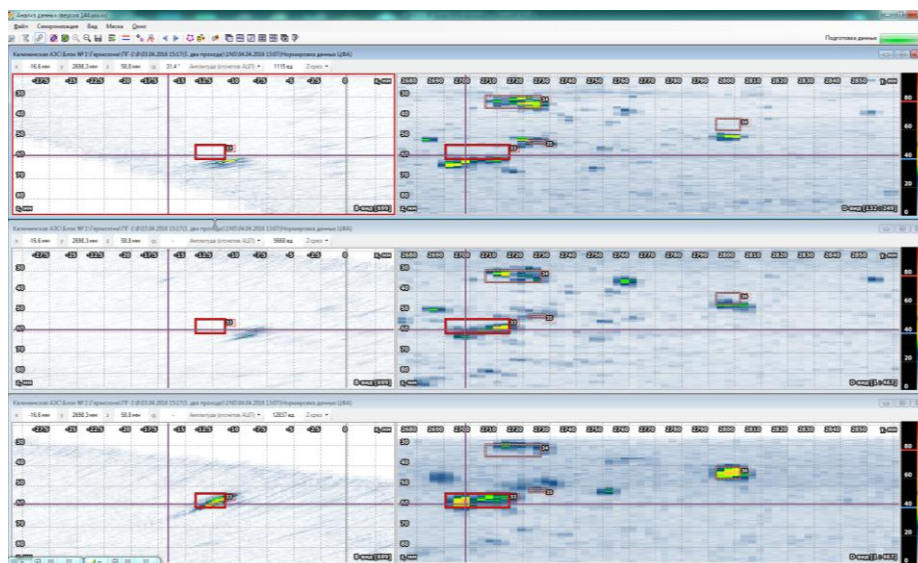


Рисунок 12 – Пример обнаружения несплошности по трем проходам

#### 4.4 Сопоставление результатов контроля

В соответствии с программой ОПЭ было выполнено сопоставление результатов РУЗК и АУЗК, результаты которого представлены на рисунке 12.

По результатам РУЗК обнаружено 22 несплошности, по результатам АУЗК с ручной расшифровкой данных – 31 несплошность, по результатам АУЗК с автоматической расшифровкой – 48 несплошностей.

При сопоставлении установлено, что из 22 несплошностей по РУЗК 19 подтверждены АУЗК, а из 31 несплошности по АУЗК с ручной расшифровкой 30 подтверждены АУЗК с автоматической расшифровкой.

Меньшее число несплошностей, выявленных по результатам РУЗК, объясняется:

- ограниченным числом углов прозвучивания (45°, 60°, 0°) при проведении контроля согласно ПНАЭГ 7-030;
- шагом сканирования в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-030-89 контроля не более 7 мм (т.е. половины ширины пьезоэлемента), при том что по данным АУЗК для всех случаев пропуска условная протяженность не превышает 3-6 мм, амплитуда на 10-12 дБ ниже уровня фиксации по ПНАЭ Г-010;
- меньшей разрешающей способностью при использовании ПЭП с частотой 2 МГц (некоторые несплошности по заключению РУЗК объединяют в себе по две несплошности, описанные отдельно по заключению АУЗК).

Меньшее число несплошностей, выявленных по результатам АУЗК с ручной расшифровкой данных, объясняется:

- утомлением оператора при поиске многочисленных мелких индикаций (субъективный фактор);
- попаданием ряда несплошностей в область реверберационных шумов призмы.

Фактически по данным автоматического анализа ложных срабатываний не было, все несплошности подтверждены при повторном ручном анализе данных.

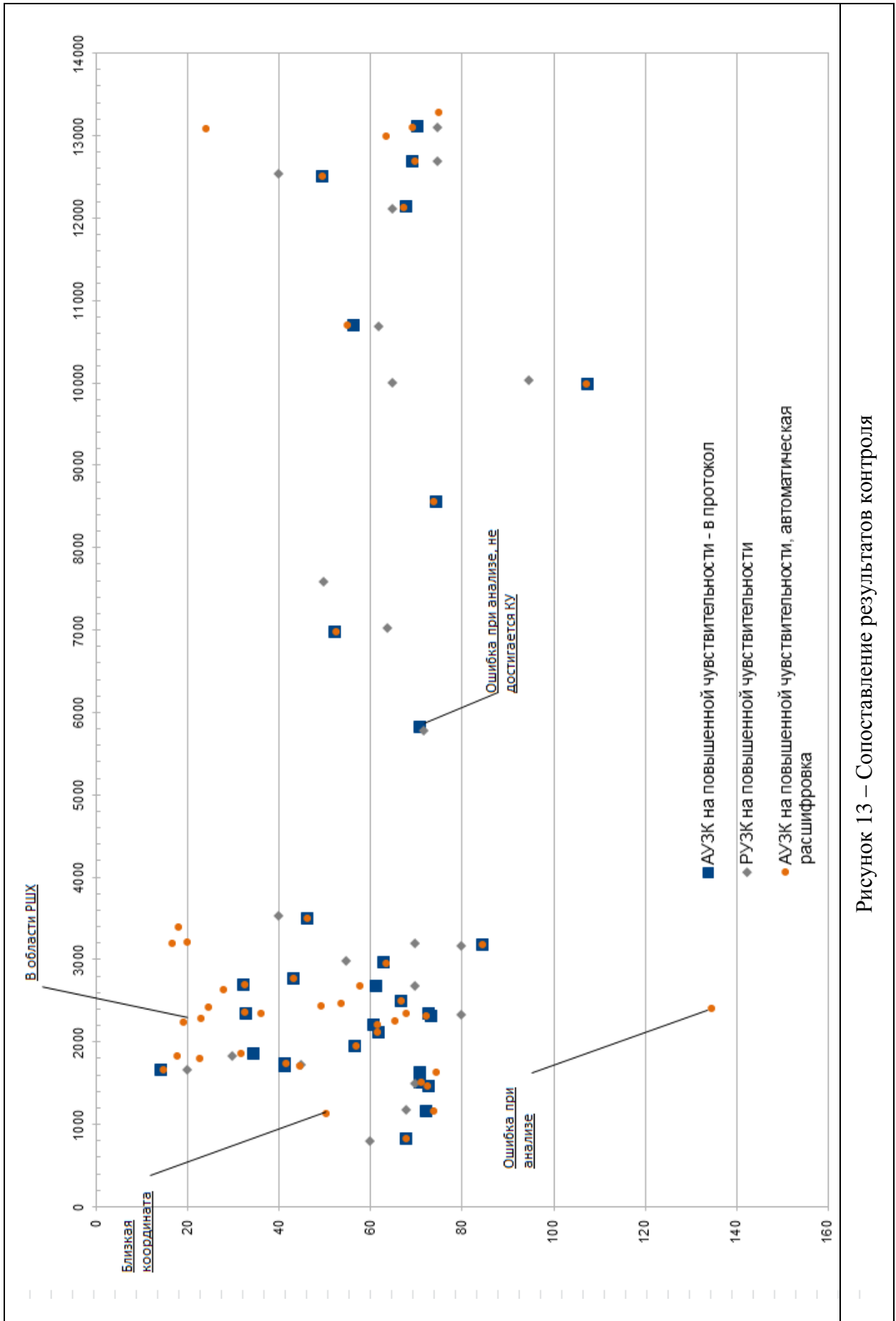


Рисунок 13 – Сопоставление результатов контроля



## 5 Выводы

1. При выполнении рутинной работы по поиску и образмериванию несплошностей, в особенности по нескольким схемам контроля неизбежно влияние человеческого фактора. Автоматический анализ позволяет свести к минимуму влияние этого фактора. При этом по данным автоматического анализа ложных срабатываний не было, все несплошности подтверждены при повторном ручном анализе данных.

2. На основании анализа полученных по программе ОПЭ данных установлено, что Система может применяться при проведении эксплуатационного контроля на АЭС, при условии проведения соответствующих аттестационных испытаний для объектов контроля отличных от сварных соединений обечаек парогенераторов.

3. На основании разработанной и утвержденной программы опытно-промышленной эксплуатации были проведены работы по РУЗК и АУЗК сварных соединений обечаек парогенератора Калининской АЭС и настроечных образцов.

4. Показано хорошее соответствие результатов РУЗК и АУЗК, с учетом особенностей, характерных для каждого из методов.

5. Для продолжения внедрения Системы рекомендуется разработать методики ее применения на следующих объектах:

- кольцевые сварные соединения главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000, ВВЭР-1200;

- кольцевые сварные соединения обечаек компенсаторов давления реакторных установок ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200;

- кольцевые сварные соединения обечаек подогревателей высокого и низкого давления турбинного отделения ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200;

- узел приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М, подверженный повреждениям в процессе эксплуатации;

- кольцевые сварные соединения аустенитных трубопроводов Ду200, Ду300 РУ РБМК, также подверженные повреждениям.