

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

**ВАРДАНЯН АРСЕН МОВСЕСОВИЧ**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС УЗЛОВ  
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ВВЭР-440**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.14.02 - “Ядерные энергетические установки”**

**Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор В.Г. Петросян**

**ЕРЕВАН 2017**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕКСТЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>10</b>
1.1.... Конструкция, назначение, условия эксплуатации и технология изготовления разнородных сварных соединений приварки коллекторов к корпусу парогенераторов ПГВ-4 ВВЭР-440.....	10
1.2. Особенности сварки комбинированных конструкций из сталей перлитного и аустенитного класса .....	15
1.3. Сварочные материалы для выполнения разнородных сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС .....	19
1.4. Причины образования повреждений сварных соединений приварки коллекторов к корпусу парогенераторов ПГВ-440.....	20
1.5. Определение характера повреждения швов №23 .....	27
1.6. Динамика обнаружения повреждений разнородных сварных соединений приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов .....	36
1.7. Выводы и конкретизация задач исследования.....	37
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКИХ И ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТА СВАРНЫХ ШВОВ ПЕРЕХОДНОГО КОЛЬЦА И ПАТРУБКА ДУ-1100 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ВВЭР-440 .....</b>	<b>40</b>
2.1. Методика экспериментального исследования.....	40
2.1.1. Система АВГУР 5.2.....	44
2.1.2. Система X-32 .....	45
2.2. Методика расчета критических и допустимых размеров глубины дефекта .....	46

2.3. Метод пластического шарнира.....	49
2.4. Метод J-интеграла .....	51
<b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВАРНЫХ ШВОВ ПЕРЕХОДНОГО КОЛЬЦА И ПАТРУБКА ДУ-1100 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-4с ВВЭР-440.....</b>	<b>52</b>
3.1. Экспериментальное исследование сварных швов переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с .....	52
3.2. Сравнительный анализ сварных швов переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440.....	57
3.2.1. Парогенератор №.1, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.....	57
3.2.2. Парогенератор №.1, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	59
3.2.3. Парогенератор №.2, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.....	61
3.2.4. Парогенератор №.2, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	63
3.2.5. Парогенератор №.3, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.....	65
3.2.6. Парогенератор №.3, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	67
3.2.7. Парогенератор №.4, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.....	69
3.2.8. Парогенератор №.4, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	71
3.2.9. Парогенератор №.5, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.....	73
3.2.10. Парогенератор №.5, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	75
3.2.11. Парогенератор №.6, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	78
3.2.12. Парогенератор №.6, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг. ....	81
3.3. Результаты экспериментальных исследований.....	83
3.4. Выводы по третьей главе.....	84

**ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКА  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К  
КОРПУСАМ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ВВЭР-440 ..... 85**

4.1.....	А
нализ возможных последствий развития (до сквозной течи) дефектов в разнородных сварных соединениях узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с.....	85
4.2.....	А
нализ действующей аварийной документации Армянской АЭС в части управления предполагаемой аварией .....	89
4.3.....	А
нализ влияния деградирующих факторов на остаточный ресурс узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с .....	90
4.4.....	Р
разработка и обоснование критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных швов №23 патрубков Ду-1100 ПГВ-4с .....	94
4.4.1.....	О
определение оценки критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей.....	94
4.4.2.....	Р
результаты применения расчетов методом конечных элементов .....	106
4.4.3.....	М
методика расчетов “Норм дефектов для патрубков Ду-1100 в районе СС №23” .....	109
4.4.4.....	О
оценка остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя	

к корпусам парогенераторов ВВЭР-440 .....	111
4.5. Выводы по четвертой главе .....	115
<b>ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>117</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>136</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>147</b>

#### **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕКСТЕ**

- АЭС Атомная электрическая станция
- ААЭС Армянская атомная электрическая станция
- НВАЭС Нововоронежская АЭС
- ВВЭР Водо-водяной энергетический реактор
- РУ Реакторная установка
- ПГ Парогенератор
- ГЦН Главный циркуляционный насос
- Ду Диаметр условный
- НПУА Национальный политехнический университет Армении
- СС Сварное соединение
- МКК Межкристальная коррозия
- РЭМ Растровый электронный микроскоп
- ASME American Society of Mechanical Engineers  
(Американское общество инженеров-механиков);
- УЗК Ультразвуковой контроль
- АУЗК Автоматизированный ультразвуковой контроль
- ТА Турбоагрегат
- ГПК Главный паровой коллектор
- АЗ Аварийная защита

- АПЭН Аварийный питательный электронасос
- ПЭН Питательный электронасос
- ПЭП Пьезоэлектрический преобразователь
- НУЭ Нормальные условия эксплуатации
- МРЗ Максимальное расчетное землетрясение
- ГИ Гидравлические испытания

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Наряду с развитием атомной энергетики и длительной эксплуатацией действующих энергоблоков, а также исходя из задачи повышения срока их службы до 45...60 лет при повышении коэффициента использования установленной мощности за счет сокращения сроков ремонта, возрастают требования к надежности и безопасной работе оборудования и трубопроводов атомной электростанции (АЭС), которые во многом определяются правильным техническим обслуживанием.

По мере роста срока эксплуатации АЭС в связи с износом оборудования и ухудшением радиационной обстановки значительно осложняются техническое обслуживание и ремонт оборудования, увеличиваются трудозатраты и численность ремонтного персонала.

Начиная с 2007 года одной из наиболее острых проблем на действующих АЭС являются повреждения разнородных сварных соединений (СС) трубопроводов и оборудования, выполненных с использованием сварочных материалов типа 10X16H25AM6 (электроды ЭА-395/9 и сварочная проволока Св-10X16H25AM6). При этом отсутствуют систематизированные сведения о характере и причинах возникновения вышеназванных повреждений. В связи с этим актуальной задачей является анализ и систематизация выявленных повреждений, определение характера и причин их образования, а также

разработка мероприятий по предотвращению образования повреждений и их устранению.

**Цель исследования.** Целью диссертационной работы является исследование разнородных сварных соединений Ду-1100 узла приварки коллекторов теплоносителя из нержавеющей стали 08X18H10T к патрубкам корпусов парогенераторов (ПГ) из стали 22К атомных энергоблоков водородного энергетического реактора 440 (ВВЭР-440).

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать и экспериментально обосновать комплекс мероприятий, способствующих предотвращению образования повреждений сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов;
- оценить влияние условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с;
- оценить размеры критических и предельно допустимых в эксплуатации дефектов сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя из нержавеющей стали 08X18H10T к патрубкам корпусов парогенераторов из стали 22К.

**Методы исследования.** Представленная в диссертации методология исследования основывается на методах науки о прочности, статистическом анализе и теории вероятности. Методологической базой послужили труды ученых и специалистов по вопросам надежности и безопасности в технике. При проведении исследований использовалась доработка существующих и разработка новых методов исследования. В процессе выполнения работы были использованы следующие методы исследования:

- автоматизированный ультразвуковой контроль (АУЗК) системы АВГУР 5.2;

- ультразвуковой контроль (УЗК) датчиками с фазированной решеткой системы X-32;
- метод пластического шарнира, для расчета критических и допустимых размеров дефекта;
- метод J-интеграла, для оценки состояния напряженного твердого тела с трещиной;
- метод конечных элементов, для оценки влияние остаточных напряжений.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

1. Определены характер и механизм повреждения сварных соединений деталей из сталей разного структурного класса (сталь 22К+сталь 08Х18Н10Т), выполненных с использованием электродов ЭА-395/9 после длительной эксплуатации.
2. Оценено влияние условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440.
3. Разработана методология расчетов критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя из нержавеющей стали 08Х18Н10Т к патрубкам корпусов парогенераторов из стали 22К.
4. Разработана методика расчетов “Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с реакторных установок (РУ) ВВЭР-440”.
5. Оценено значение остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методология расчетов критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных соединений узла

приварки коллекторов теплоносителя из нержавеющей стали 08X18H10T к патрубкам корпусов парогенераторов из стали 22К.

2. Методика расчетов “Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 парогенераторов реакторных установок ВВЭР-440”.
3. Определение значения остаточного ресурса сварного соединения для условий нормальной эксплуатации.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- международном семинаре “NDE Methods and Results of Composite Welds Inspections of ANPP Steam Generators, Participants from USA, Russian, Ukrainian, Czech and Armenian organizations” (2-5 сентября 2014г., Ереван, РА);
- международном семинаре Московского центра “WANO” “Monitoring and Maintenance of Welds Connecting the Primary System Collectors With the SG Nozzles at the Stations with VVER-440 and VVER-1000” (18-22 мая 2015г., ААЭС, РА);
- научном семинаре кафедры ядерной физики Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (1-2 марта, 2017г., Киев, Украина).
- научных семинарах кафедры “Теплоэнергетика и защита окружающей среды” Национального политехнического университета Армении - НПУА, (2014-2017гг., Ереван).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в четырех научных статьях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, списка сокращений, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 96 наименований, и трех приложений. Общий объем работы,

включая приложения, составляет 148 страницы. Основной объем – 128 страницы, включая 58 рисунков и 43 таблиц.

## **ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Конструкция, назначение, условия эксплуатации и технология изготовления разнородных сварных соединений приварки коллекторов к корпусу парогенераторов ПГВ-4 ВВЭР-440**

Водо-водяной энергетический реактор электрической мощностью 440 МВт (ВВЭР-440) разработан в 60-х годах ОКБ “Гидропресс”.

В состав каждого блока АЭС с реактором ВВЭР-440 входят 6 парогенераторов, которые в зависимости от типа проекта также имеют некоторое различие в конструкции [1] (рис. 1.1).

Для реакторной установки ААЭС сейсмической модификации В-270 парогенераторы имеют обозначение ПГВ-4с и отличаются от модельного ряда существенным антисейсмическим усилением.

Парогенератор ПГВ-4с предназначен для выработки сухого насыщенного пара давлением 4,6 МПа с температурой 258...260 °С в составе атомной электростанции с ВВЭР-440 (В-270) и является составной частью циркуляционных петель 1-го контура. ПГ энергоблока № 2 (2ПГ-1÷6) относятся к основному оборудованию ААЭС и являются элементами нормальной эксплуатации, важными для безопасности. Классификационное обозначение

элементов парогенераторов:

- корпус с патрубками, крышками и деталями узлов уплотнения по 2-му контуру, коллекторы с крышками и деталями узлов уплотнения по 1-му контуру относятся к классу 1Н по ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ-88/97), к I категории сейсмостойкости – по НП-031-01, группе А – по ПНАЭ Г-7-008-89;
- теплообменные трубки и паровой коллектор относятся к классу 2Н по ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ-88/97), к I категории сейсмостойкости – по НП-031-01, группе В – по ПНАЭ Г-7-008-89;
- опоры и подвески ПГ относятся к классу 3Н по ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ-88/97), к I категории сейсмостойкости – по НП-031-01.

Проект В-270 является сейсмической модификацией проекта В-230 российской реакторной установки ВВЭР-440 с учетом условий площадки ААЭС.

Интерес представляют следующие особенности проекта :

- в составе реакторной установки В-270 предусмотрены сейсмостойкие парогенераторы ПГВ-4с (в отличие от стандартных ПГВ-4 других ВВЭР-440);
- все узлы ПГ усилены на стадиях проектирования и изготовления для повышения значений допускаемых в них напряжений в среднем в 2...3 раза. В частности, расчетные напряжения в проблемных сварных швах составили  $800 \text{ кг/см}^2$ , допускаемое напряжение повышено до  $2080 \text{ кг/см}^2$ ;
- для исключения перемещения корпусов ПГ при сейсмических воздействиях на каждом ПГ установлено по восемь гидроамортизаторов;
- в тех же целях на каждой петле трубопроводов первого контура установлено по 7 гидроамортизаторов;
- трубопроводы питательной воды и паропроводы (механически связанные с корпусами ПГ) также сейсмически укреплены амортизаторами;
- все амортизаторы подобраны с трехкратным запасом.

Перечисленные особенности существенно снижают вероятность возникновения в элементах трубопроводов и оборудования критических напряжений при сейсмических событиях (практически сводят к нулю).

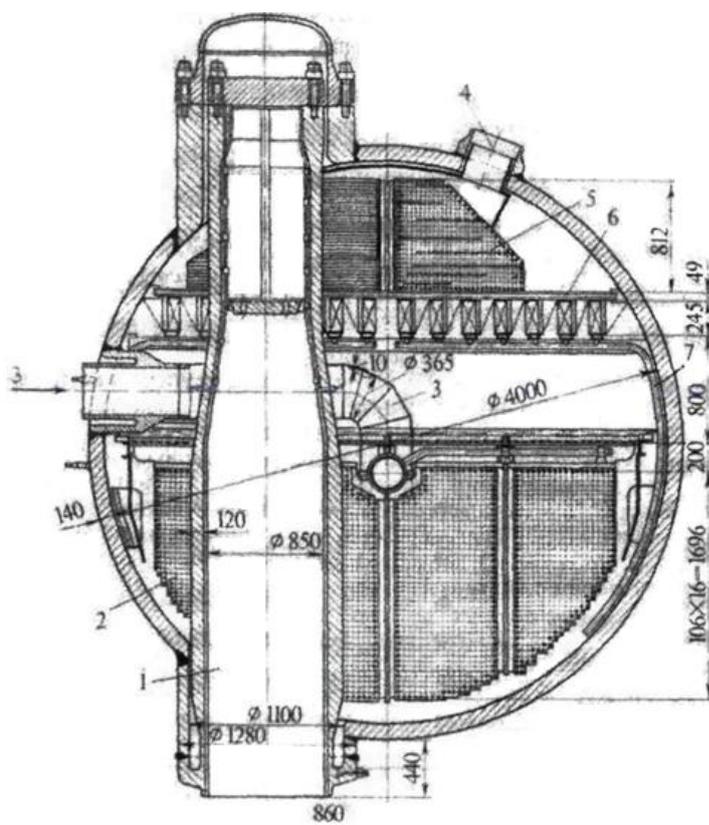
В каждом парогенераторе имеются по два коллектора по 1-му контуру, через которые теплоноситель ( $T=290^{\circ}\text{C}$ ) распределяется по теплообменным трубкам и испаряет в корпусе ПГ поступающую в него питательную воду.

Коллекторы являются важнейшей частью парогенераторов ПГВ-440. Они предназначены для раздачи теплоносителя по теплообменным трубкам.

Из-за разницы температуры теплоносителя на входе и выходе из ПГ коллекторы называют “горячими” и “холодными”.

Оба коллектора при изготовлении парогенераторов вваривались в корпус ПГ по одинаковой технологии: вначале выполнялось сварное соединение приварки переходной втулки из стали 08X18H10T к воротнику коллектора, который изготавливается также из стали 08X18H10T, а затем переходная втулка приваривается к патрубку корпуса парогенератора из углеродистой стали 22К (сварное соединение №23) [2].

Сварные соединения, однотипные сварным швам № 23х и № 23г в проектах атомных блоков ВВЭР-440 других модификаций (В-213, В-230), имеют



другое обозначение - соответственно 76 и 72. В дальнейшем для удобства изложения все вышеназванные однотипные СС будут называться швом №23.

Рис. 1.1. Конструкция парогенератора АЭС с ВВЭР [2]: 1 - коллектор теплоносителя; 2 - испарительная поверхность нагрева; 3 - подача питательной воды; 4 - отвод перегретого пара; 5 - перегревательная поверхность нагрева; 6 - сепарационное устройство; 7 - опускные трубы для отвода сепарата

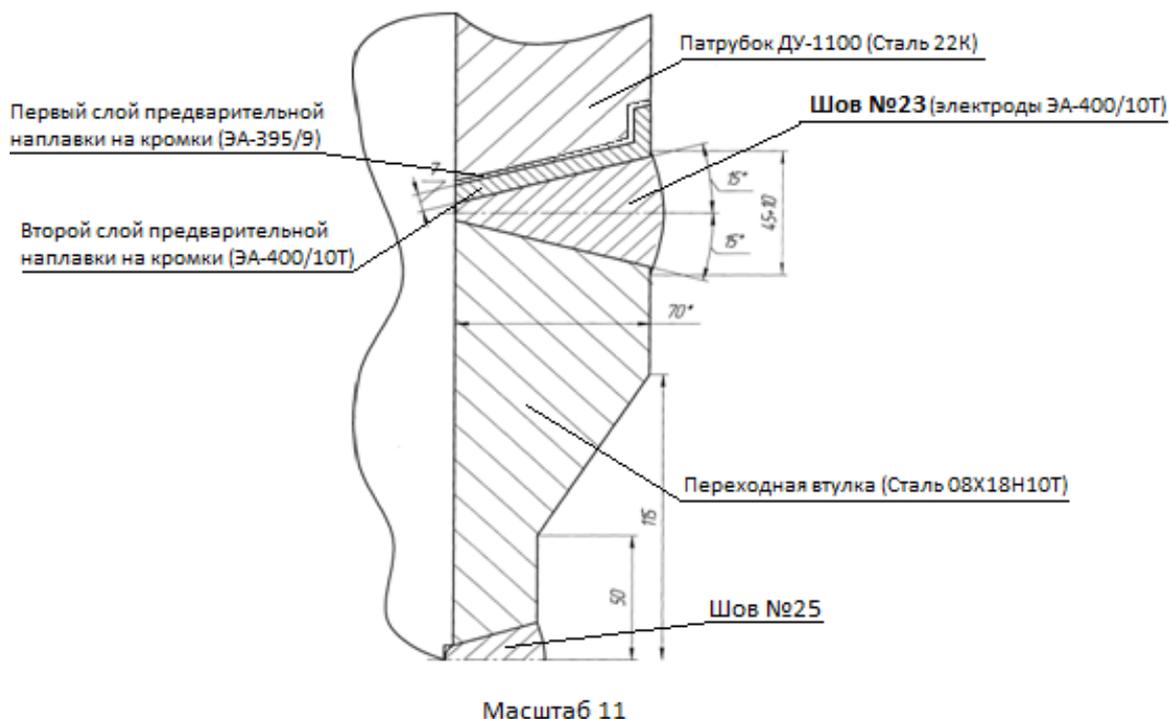


Рис. 1.2. Эскиз шва №23 приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-4 [3]

На рис. 1.2 представлен эскиз конструкции сварного соединения узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубку Ду-1100 парогенератора ПГ-1 Армянской АЭС. Эта конструкция включает [3]:

1. Патрубок парогенератора Ду-1100 из стали 22К с предварительной наплавкой на кромку в два слоя: первый слой - ЭА-395/9 (Св-10Х16Н25АМ6) + второй слой ЭА-400/10Т (Св-04Х19Н11М3). Наплавка производится с подогревом до 100°С с последующей термообработкой по

режиму окончательного отпуска  $640^{+20}$  °С в течение 9 часов. Эта операция выполнялась на “Ижорском заводе” (город Колпино, Россия)

2. Переходную втулку из стали 08Х18Н10Т, имеющую конусный переход по наружному диаметру, с изменением толщины стенки втулки от 75 мм (для приварки к патрубку корпуса парогенератора) до 35 мм (для приварки переходной втулки к циркуляционному трубопроводу). Такая конструкция обеспечивает восприятие значительных эксплуатационных нагрузок.
3. Сварной шов №23 приварки переходной втулки к патрубку парогенератора из стали 22К с предварительно наплавленной кромкой, выполняемый ручной электродуговой сваркой электродами ЭА-400/10Т. Сварка осуществлялась без подогрева. Отпуск для снятия остаточных напряжений не проводился. Эта операция выполнялась на Подольском машиностроительном заводе им. Орджоникидзе (ЗиО) [4].
4. Однородный сварной шов №25, выполняемый на монтаже ручной сваркой электродами ЭА-400/10Т. Этим швом производится присоединение циркуляционного трубопровода первого контура к коллектору ПГ (обеспечивается поступление теплоносителя в ПГ). Сварка осуществляется без подогрева и последующего отпуска.

Шов №23 представляет собой СС деталей из различных по структурному классу сталей: патрубка из перлитной стали 22К и втулки-переходника из стали 08Х18Н10Т. Переход от перлитной стали к аустенитной осуществлялся через предварительную наплавку. Такие сварные соединения из сталей различных структурных классов называются по-разному (например, композитное, двухкомпонентное, переходное) однако здесь и далее мы будем называть их “разнородными сварными соединениями”, как принято в ГОСТе на обозначение терминов в сварочной технике, и в ПН АЭГ - 7 - 009 -89 [4].

Особенностью этих швов являются их сложная геометрия и, главное, многокомпонентность (в узле присутствуют пять различных металлов и пять границ их соприкосновения)(рис. 1.2).

Изготовление парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440 началось в 1967 году на двух предприятиях: вначале на “Ижорском заводе”, где производились корпус и коллекторы теплоносителя, которые затем передавались на ЗиО, где производились установка и приварка коллектора к корпусу парогенератора швами №25 и №23 через переходную втулку, а также сверление отверстий в коллекторе, набивка и варка теплообменных труб [3].

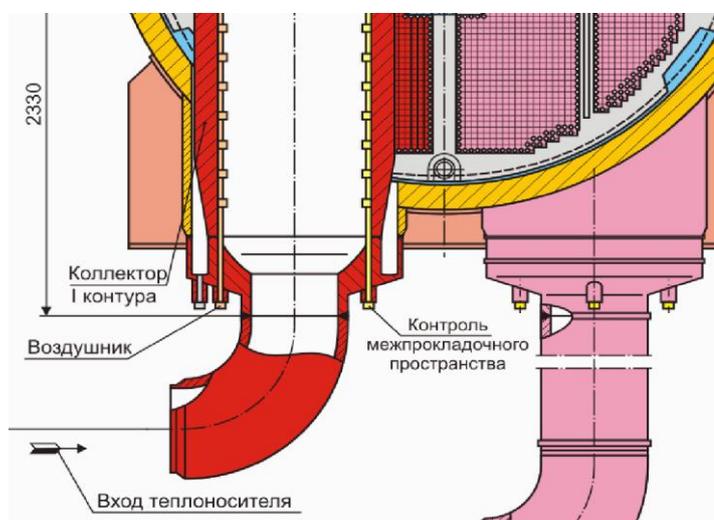


Рис. 1.3. Схема узла приварки

Наличие трещин в сварном шве коллектора с корпусом парогенератора представляет угрозу возникновения течи в этом участке. Специфика такой течи заключается в том, что она расположена в нижней части корпуса (ниже уровня трубчатки) и не позволяет удерживать воду в ПГ (рис 1.3).

Замена парогенераторов атомных электростанций является сложной технической задачей, которая не всегда экономически обоснована (высокая стоимость оборудования и работа), особенно для атомных электростанций, работающих ближе к концу проектного периода.

Указанные обстоятельства значительно повышают значимость исследования разнородных сварных соединений, чтобы обеспечить надежную работу. Эффективность этих действий зависит от разработки углубленного исследования с целью выявления причин их возникновения и всестороннего анализа проблем.

## **1.2. Особенности сварки комбинированных конструкций из сталей перлитного и аустенитного класса**

Оборудование АЭС, исходя из условий эксплуатации, изготавливается из сталей различного структурного класса. Поэтому при производстве атомно-энергетического оборудования неизбежно возникает необходимость выполнять разнородные сварные соединения и, прежде всего, сварку деталей из сталей перлитного и аустенитного класса [5].

Согласно В.Н. Земзину [6], при сварке деталей из стали перлитного и аустенитного класса, кроме общих положений свариваемости, необходимо учитывать дополнительные факторы, определяющие выбор сварочных материалов, режим сварки, способы, а также условия эксплуатации и требования к работоспособности изделия, а именно:

- химическая и структурная неоднородность состава металла шва, образующуюся за счет проплавления при сварке основного металла другого легирования, чем наплавленный металл;
- развитие в зоне сплавления (под зоной сплавления условно понимают область, включающую границу сплавления и непосредственно примыкающие к ней участки шва и околошовной зоны переменного состава разнородных материалов) малопрочных и хрупких прослоек переменного состава;

- наличие остаточных напряжений в соединениях разного структурного класса, вызванных разницей коэффициентов линейного расширения, которые не могут быть сняты термической обработкой.

К вышеназванным факторам следует добавить активизацию при проведении термообработок “вредных” диффузионных процессов, приводящих к сенсбилизации межкристаллитной коррозии (МКК), а также сложные процессы коррозии из-за разницы электрохимических потенциалов в контакте разнородных сталей, приводящих при постоянном контакте с теплоносителем к развитию гальванической коррозии [7-15].

Длительный период эксплуатации (до 60 лет), сложность проведения и ограниченность технологической доступности для неразрушающего контроля (ультразвуковым методами) усугубляют проблемы мониторинга эксплуатационного состояния этих сварных соединений.

Свариваемость разнородных СС должна изучаться с учетом исследований Г.Л. Петрова [16] и А.А. Ерохина [17], в которых показано, что состав металла шва в пределах одного слоя для большинства методов дуговой сварки и применяемых материалов является полностью однородным, за исключением узкого участка, примыкающего к границе сплавления и характеризующегося изменением содержания входящих в него элементов от состава основного металла до состава металла шва.

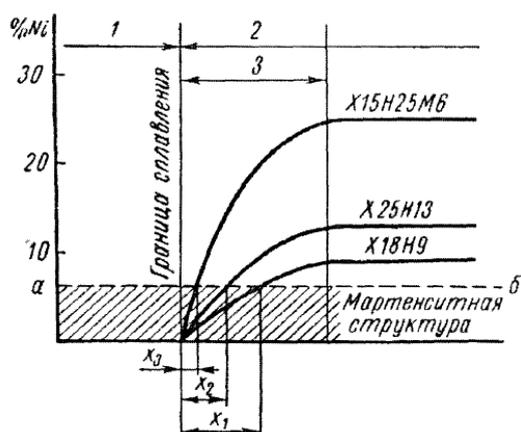


Рис. 1.4. Схема определения ширины хрупких кристаллизационных прослоек в зоне сплавления: 1 - основной металл (низколегированная сталь перлитного класса); 2 - аустенитный шов; 3 - зона кристаллизационных прослоек [6]

Этот участок шва (рис. 1.4), располагающийся вблизи границы сплавления и характеризующийся переменным химическим составом, принято называть “кристаллизационной” прослойкой [6].

Структура и свойства кристаллизационных прослоек зависят от сочетания составов основного металла и шва, а их протяженность, определяемая долей участия в зависимости от способа и режима сварки и, следовательно, разбавления, колеблется в пределах 0,05...0,6 мм [18,19]. В зоне сплавления наиболее распространенных СС перлитных сталей с аустенитным швом кристаллизационные прослойки, содержащие 3...12% Сг и 2...7% Ni, имеют структуру высоколегированного мартенсита и являются хрупкими [20,21].

Шов при изменении структуры металла приводит к неизбежному изменению механических свойств [22- 24].

Таблица 1.1

Коэффициенты линейного расширения сталей и сварных швов конструкций [6]

Структурный класс	Марка стали или тип шва	$\alpha \cdot 10^{-6}$ в интервале		
		20...200 °С	20...400 °С	20...600° С
Перлитный	Сталь 20	12,1	13,4	14,4
	X18H10T	17,0	17,5	18,2
Аустенитный	X25H13	15,8	16,8	17,8
	X16H25M6	14,6	15,4	16,0
Высоконикелевый	X15H60M7	12,1	12,7	13,6

Важным фактором, который следует учитывать при выполнении разнородных сварных соединений, являются остаточные напряжения. Основными источниками возникновения внутренних напряжений при сварке разнородных сталей является различие коэффициентов линейного

расширения свариваемых сталей (табл. 1.1), приводящее к образованию остаточных напряжений непосредственно после сварки [6,22].

При нагревании разнородных СС до высоких температур возникают специфические, присущие разнородным сварным соединениям особенности.

Термообработка после сварки сталей разного структурного класса (на стадии нагрева и высокотемпературной выдержки), как и ожидается, снимает остаточные напряжения, однако, в отличие от однородных СС, при последующем охлаждении в соединениях возникают новые внутренние напряжения, обусловленные разностью коэффициентов линейного расширения свариваемых материалов [19].

Таким образом, термическая обработка разнородных сварных соединений после сварки не только не снимает остаточные напряжения, но, наоборот, может привести к повышению их уровня [19].

### **1.3. Сварочные материалы для выполнения разнородных сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС**

Согласно ПН АЭ Г-7-009-89 [4], при выполнении сварных соединений деталей оборудования и трубопроводов АЭС из сталей перлитных и аустенитных классов между собой при толщине до 10 мм сварка должна проводиться без предварительной наплавки на кромки с использованием сварочных материалов как типа 10X16H25AM6, так и типа 07X25H13 [4].

При толщине свариваемых деталей более 10 мм сварные соединения должны выполняться с предварительной наплавкой на кромки в два слоя: первый слой - сварочными материалами типа 10X16H25AM6, второй слой - сварочными материалами типа 04X19H11M3. При этом толщина первого слоя обосновательно не регламентируется. Толщина наплавки после механической обработки должна составлять  $(6\pm 2)$  мм под ручную дуговую сварку с

покрытыми электродами и аргонодуговую сварку и  $(9\pm 2)$  мм - под автоматическую под флюсом [4,25].

Использование комбинации сварочных материалов, в которой для предварительной наплавки первого слоя применяются сварочные материалы типа 07X25H13 в ПН АЭ Г-7-009-89, не предусмотрено, несмотря на то, что такие материалы допущены для выполнения разнородных СС без предварительной наплавки.

В европейских странах, наоборот, для сварки деталей из перлитных и аустенитных сталей используются только материалы типа 07X25H13 (E-309) или 02X25H13 (E-309L) по ASME, обладающие высокой стойкостью к МКК, при этом ограничения по толщине свариваемых деталей отсутствуют [26].

Как показали исследования, выполненные в последние годы, состав типа 10X16H25AM6 обладает повышенной склонностью к МКК, и поэтому разнородные сварные соединения, выполненные с его использованием, должны быть защищены от контакта с теплоносителем [27-39].

В некоторых случаях и, прежде всего, при ремонте на действующих АЭС техническая возможность выполнять защитную антикоррозионную наплавку отсутствует, и поэтому возникает необходимость выполнения ремонта с использованием сварочных материалов типа 07X25H13. При этом необходимо обеспечить не только высокую коррозионную стойкость разнородных сварных соединений, но и требуемую прочность [40].

Кромки которых наплавлены аустенитными присадочными материалами, должны подвергаться “предварительному отпуску по режиму окончательного отпуска”.

На это противоречие должно быть обращено внимание при проведении экспериментальных исследований.

#### **1.4. Причины образования повреждений сварных соединений приварки коллекторов к корпусу парогенераторов ПГВ-440**

Впервые недопустимые дефекты разнородных сварных соединений в швах №23"х" были выявлены при эксплуатационном контроле в период ППР-2007 энергоблока №3 Нововоронежской АЭС (НВ АЭС) на парогенераторе ЗПГ-1 приварки холодного коллектора к патрубку парогенератора Ду-1100 [41].

Парогенератор ЗПГ-1 (заводской № 5540) [3] был изготовлен в 1969 году на Подольском заводе им. Орджоникидзе (ЗиО). Этот парогенератор был первым для серийных блоков ВВЭР-440. Он успешно эксплуатировался начиная с 1971 года в течение 36 лет.

Выявление повреждения шва №23 было связано с разработкой к этому моменту новой методики УЗК, позволяющей проводить эффективный эксплуатационный контроль. До этого момента шов №23 контролировался только внешним осмотром [42, 43].

Для устранения повреждения в срочном порядке была разработана технология ремонта, полностью повторяющая заводскую при выполнении шва №23 на ЗиО [44].

В том же 2007 году подобное повреждение шва №23 (76) было выявлено на Кольской АЭС ВВЭР-440, был также вырезан и исследован темплет, исследование которого полностью подтвердило идентичность с трещиной, ранее выявленной на НВ АЭС [45]. Уже тогда стало ясно, что такие повреждения имеют практически все парогенераторы ПГВ-440 после длительной эксплуатации. Поэтому в 2009 году было принято решение провести ремонты всех сварных соединений №23 (76,77) путем полной вырезки всех швов, их восстановления с использованием сварки, то есть ремонт стал выполняться в плановом порядке.

При разработке конструкции узла крепления коллекторов к корпусам парогенераторов ПГВ-440, а затем ПГВ-1000 были использованы аналогичные конструкции: приварка патрубка корпуса парогенератора (углеродистая, перлитная сталь 22К), сварка коллекторов осуществлялась также с использованием узла воротник коллектора + патрубков парогенератора, соответственно швы №23 (для ПГВ-440) и №111 (для ПГВ-1000) [46].

С 1998 года на парогенераторах российских блоков и ближнего зарубежья визуальным контролем начали фиксироваться коррозионные трещины в зоне сварного соединения №111 горячего коллектора с патрубком корпуса ПГВ-1000. Для устранения дефектов была разработана специальная технология местного (участкового) ремонта.

За первые двенадцать лет (до 2010 г.) ремонт поврежденной зоны сварного соединения №111 был проведен на семи парогенераторах ПГВ-1000, причем на четырех парогенераторах повторно, что свидетельствует о недостаточной эффективности разработанной методики частичного ремонта.

Что касается сварных соединений №23 ПГВ-440, то до 2007 года каких-либо замечаний по их качеству выявлено не было, как впоследствии выяснилось, из-за несовершенства применяемых в то время методик неразрушающего контроля. Во многом это было связано с тем, что объемы эксплуатационного контроля сварных соединений №111 (ПГВ-1000) и №23 (ПГВ-440) существенно различались, а именно - практически все дефекты на швах №111 обнаруживались методами УЗК, которые на тот момент не применялись на швах №23.

Для повышения эффективности контроля в ходе после эксплуатации с 2005 года были начаты исследования по разработке методик контроля УЗК, в результате чего была разработана специализированная методика (система автоматизированного УЗК) АВГУР 5.2. В 2007 году при проведении АУЗК системы АВГУР 5.2 на швах №23"г" и №23"х" парогенераторов №3ПГ-1 НВ АЭС

(парогенератор 3 блока ВВЭР-440) были обнаружены плоскостные протяженные дефекты в области сплавления основного металла патрубка и металла наплавки [41].

После обнаружения дефекта было принято решение о вырезке темплета для определения характера и причин образования повреждения. Выявленное повреждение оказалось очень опасным - коррозионная трещина по линии сплавления аустенитной наплавки с основным перлитным металлом корпуса с максимальной высотой 51 мм [43]. При дополнительном обследовании выяснилось, что трещина является кольцевой, поэтому все сварное соединение было удалено.

После извлечения вырезанных темплетов (рис 1.5) была произведена их предварительная механообработка, а затем эти шлифы были переданы в ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" для детального исследования. Позднее в том же 2007 году аналогичные повреждения были выявлены на сварном соединении 2ПГ-4"г" Кольской АЭС, из которых вырезались шлифы, которые для повышения достоверности исследования также были переданы в ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" [45, 47].

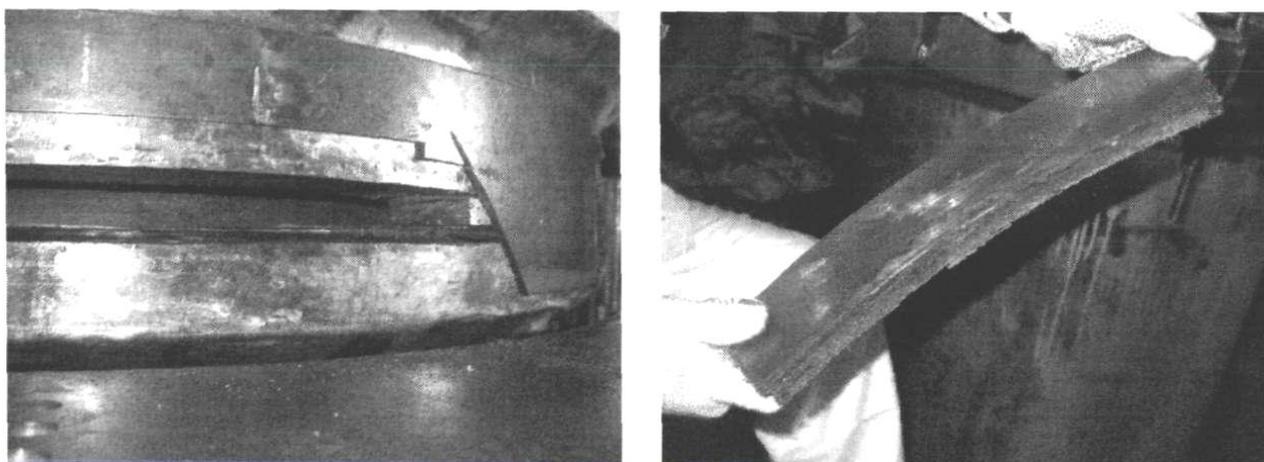


Рис. 1.5. Вырезка темплета для исследования поврежденного шва №23. Блок №3 Нововоронежской АЭС

Для определения характера дефекта в сварных соединениях №23 (76,77) и причин его образования были использованы следующие методы исследования шлифов: внешний осмотр, фрактографические исследования, определение химического состава различных зон сварного соединения, оптическая металлография, измерение микротвердости, сканирующая электронная микроскопия.

**Внешний осмотр.** При внешнем осмотре шлифов (рис. 1.6) было установлено, что все шлифы имеют одинаковые зоны, характерные для всех разнородных сварных соединений, а именно - основной металл патрубка парогенератора - перлитная сталь 22К; зона сплавления основного металла патрубка парогенератора и первого слоя предварительной наплавки; предварительная наплавка кромок, выполненная в два слоя: первый слой - электродом ЭА 395/9 (аустенитная сталь 10Х16Н25АМ6) и второй слой - электродом ЭА400/10Т (аустенитная сталь 04Х19Н11М3); металл шва, выполненного электродом ЭА400/10Т (аустенитная сталь 04Х19Н11М3); основной металл переходной втулки коллектора теплоносителя 08Х18Н10Т; внутренняя поверхность контакта сварного соединения с рабочей средой [43].

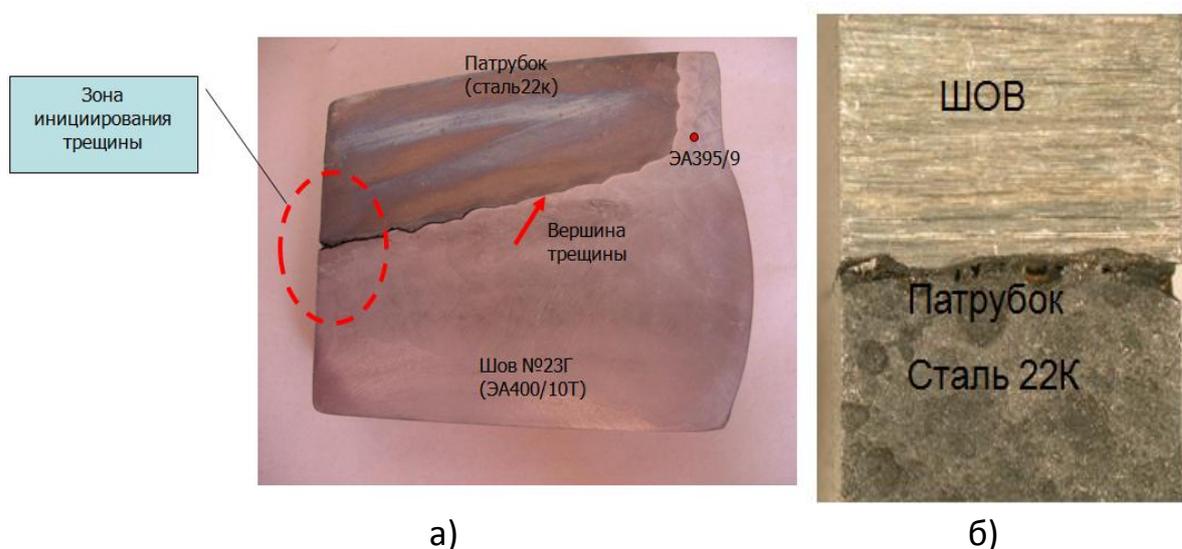


Рис. 1.6. Образец №23х-1: а - внешний вид обнаруженной трещины; б - поверхность, контактирующая с рабочей средой

Результаты внешнего осмотра поверхностей представленных темплетов (рис. 1.6) позволили констатировать: повреждения во всех исследованных темплетах имеют вид трещин; трещины берут начало со стороны контакта сварного соединения с теплоносителем в зоне соединения сталь 22К - металл первого слоя промежуточной наплавки (электродом ЭА 395/9, 10Х16Н25АМ6); трещина распространяется вдоль линии сплавления сталь 22К - наплавленный металл электрода (ЭА-395/9, 10Х16Н25АМ6); длина видимых трещин в различных темплетах различна (от 10 до 55 мм); внутренняя поверхность темплета покрыта темным слоем оксида металла; по всему сечению шва не наблюдается участков, где отсутствует наплавка первого слоя, однако она неравномерна по ширине; трещина ветвистая; поверхность перлитной стали, контактирующей со средой кармана коллектора, имеет многочисленные мелкие очаги; в силовом корне шва, выполненного электродами ЭА-400/10, визуально (на шлифах) каких-либо повреждений не обнаружено [45].

**Фрактографическое исследование.** Фрактографическое исследование было проведено на образцах, изготовленных вырезкой из темплета. После резки один образец распался по трещине на две части, что свидетельствует о том, что высота трещины была более 50 мм. На рис. 1.7 представлена поверхность раскрытой трещины, а на рис. 1.8 приведены области долома, который проходил и через наплавку, и через металл шва. Из анализа изображения долома можно заключить, что разрушение было вязким. В области переходной наплавки размер ямок отрыва меньше, что связано с процессом рекристаллизации этого слоя. На рис. 1.9 представлены окислы, образовавшиеся на поверхности трещины [48]. Огранка кристаллов окислов говорит о том, что процесс их образования проходил практически в равновесных условиях. Анализ полученных результатов по сварному соединению позволяет отметить [49]: рост магистральной трещины носит

стадийный характер; инициирование трещины происходит в зоне линии сплавления разнородных материалов разнородного сварного соединения и сопровождается интенсивным растворением основного металла с развитием очага локальной коррозии; разрушение металла наплавки и металла шва в долоте происходит по механизму вязкого разрушения, о чем свидетельствуют различного размера ямки отрыва.

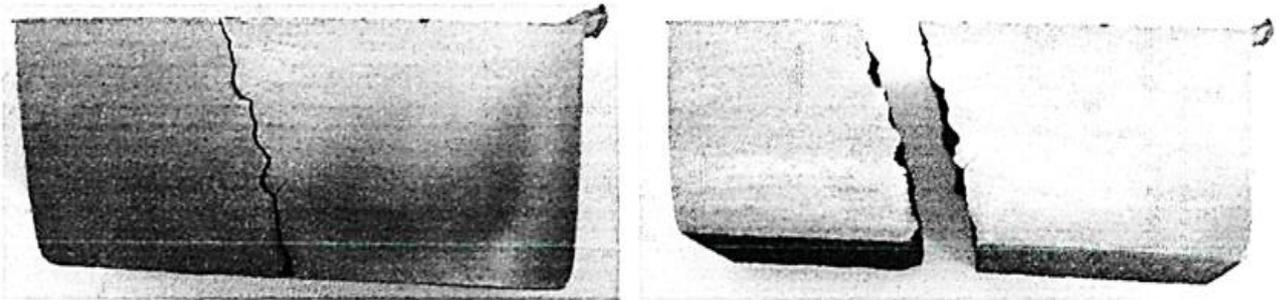
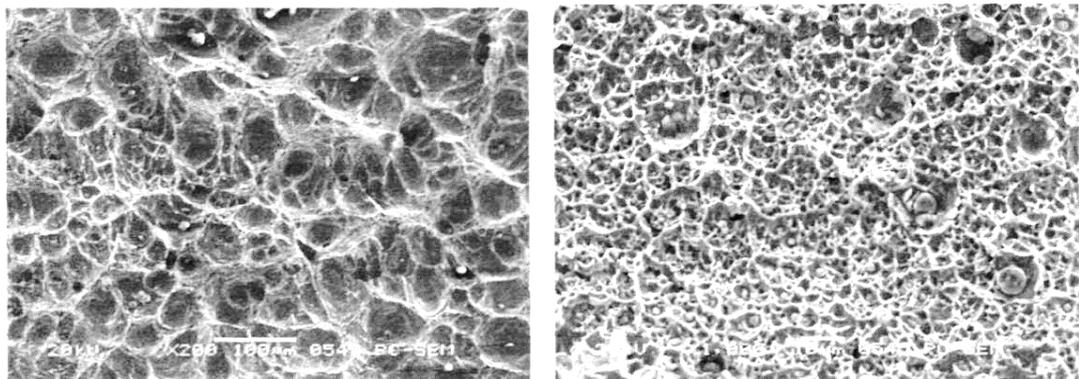


Рис. 1.7. Поверхность раскрытой трещины [49]



а)

б)

Рис. 1.8. Область долома: а - металл шва; б - наплавка [49]

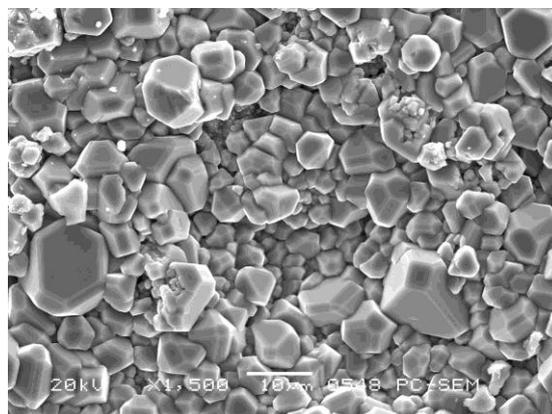


Рис. 1.9. Окислы ( $Fe_3O_4$ ) на поверхности раскрытой трещины [49]

**Определение химического состава.** Химический состав основного металла (22К), предварительных наплавов на сварочные кромки (ЭА-395/9+ЭА-400/10Т), металла шва (электроды ЭА400/10Т) и основного металла коллектора определяли методом спектрального атомно-эмиссионного анализа.

Результаты приведены в табл. 1.2. Как видно из данных таблиц, химический состав основного металла и металла шва соответствует требованиям нормативных документов “Оптическая металлография и измерение микротвердости” [48].

Исследования выполнялись при помощи цифровой системы для оптической металлографии на базе микроскопа "Neophot", а также стереомикроскопа "Olympus" CZ 61 с цифровой фотокамерой С5060, а измерения микротвердости производились при помощи микротвердомера ПМТ-3, предназначенного для измерения микротвердости металлов методом

---

Содержание элемента, %
------------------------

---

вдавливанию алмаза в испытуемый материал, на шлифах, подготовленных к металлографическим исследованиям [49,50].

Таблица 1.2

Результаты химического анализа основного металла и металла шва в сварном соединении № 23х-1 парогенератора ЗПГ-1 НВ АЭС

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	Mo	Nb	V
Основной металл	0,23	0,32	0,80	0,21	0,19	0,15	0,019	0,022	-	-	-
Металл шва	0,066	0,46	2,35	18,7	11,7	0,15	0,015	0,012	2,71	<0,01	0,60
Состав марки стали 22к	0,19-0,26	0,20-0,40	0,75-1,00	≤0,40	≤0,50	≤0,30	≤0,025	≤0,025	-	-	-
Состав металла шва, выполненного электродом марки ЭА-400/ЮТ	≤0,10	≤0,6	1,1-3,1	16,8-19,0	9,0-12,0	-	≤0,030	≤0,025	2,0-3,5	-	0,30-0,75

### 1.5. Определение характера повреждения швов №23

Определение характера повреждения швов №23 выполняется для исследования и анализа микроструктуры представленных образцов методом сканирующей электронной микроскопии.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) является одним из наиболее универсальных приборов для исследования и анализа микроструктурных характеристик тел. Принцип РЭМ заключается в сканировании поверхности образца сфокусированным электронным пучком и анализе или низкоэнергетичных вторичных электронов, или отраженных от поверхности электронов [48].

**Исследование макроструктуры.** Исследование макроструктуры образцов сварных соединений выполнялось на трех шлифах, вырезанных из разных участков швов. На всех трех шлифах (рис. 1.10-1.13) обнаружены магистральные трещины. В образцах №23х-2 и №23г переходная наплавка присутствует вдоль всей линии сплавления (рис. 1.12 и 1.13) [51].

Для подтверждения сказанного были проведены дополнительные исследования образца №23х-1 на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионной приставкой (рис 1.14 и 1.15) [29]. На рис. 1.14 приведено

изображение обратнорассеянных электронов участков, выделенных на рис. 1.15. На рис. 1.14 а приведен участок с полноценным переходным покрытием, что подтверждается данными химического состава (микрорентгеноспектральный анализ).

Из рассмотренных данных, представленных на рис. 1.10-1.15, следует, что имеются участки, где предварительная наплавка на кромки патрубка корпуса сделана некачественно. В некоторых местах этой наплавки выявлены нарушения технологии, заключающиеся в полном переплаве первого слоя предварительной наплавки. Это свидетельствует о том, что наплавка первого слоя на перлитную кромку патрубка велась при больших значениях сварочного тока на форсированных режимах, что привело к большому местному разбавлению и, как следствие, образованию мартенситных прослоек. На рис. 1.14 б виден участок, на котором заканчивается переходная наплавка, и основной металл контактирует непосредственно с металлом шва. На некоторых участках наплавка переплавлена полностью, а иногда она присутствует, но толщина ее составляет десятые доли мм (рис. 1.15) [48].

На шлифе образца №23х-2 (рис. 1.16) четко прослеживается слой металла околошовной зоны со стороны низколегированной стали (обезуглероженный слой), характерный для разнородных сварных соединений и возникающий за счет диффузии углерода из углеродистой стали [51].

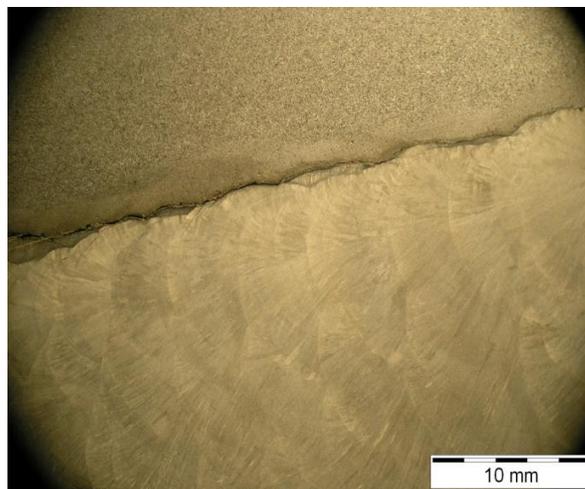
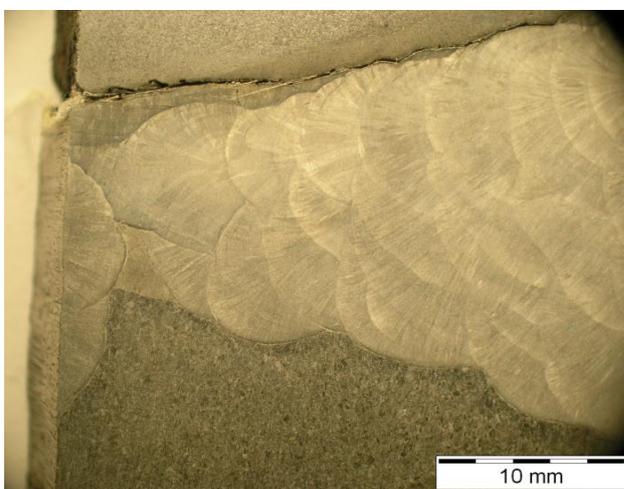
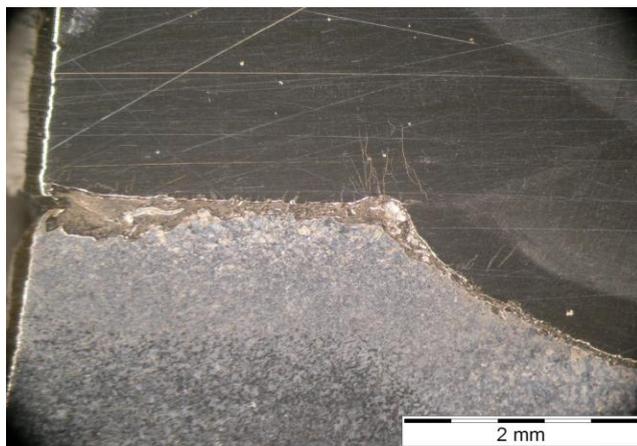
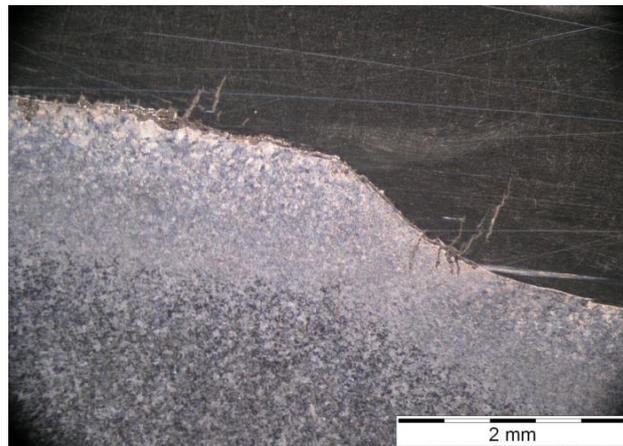


Рис. 1.10. Макроструктура образца №23х-1, корень шва [48]



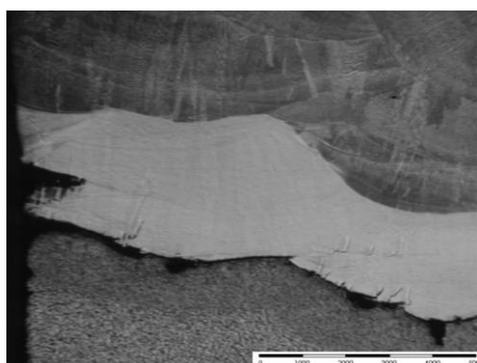
а)

Рис. 1.11. Макроструктура образца №23х-1, средняя часть

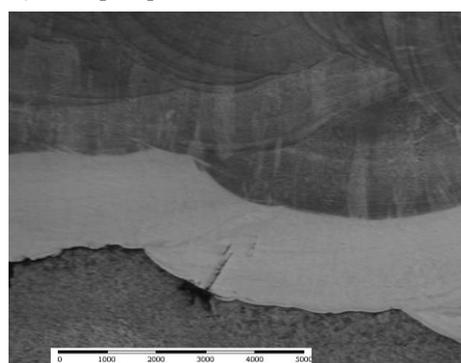


б)

Рис. 1.12. Макроструктура образца №23х-2: а - начало трещины; б - конец трещины [48]

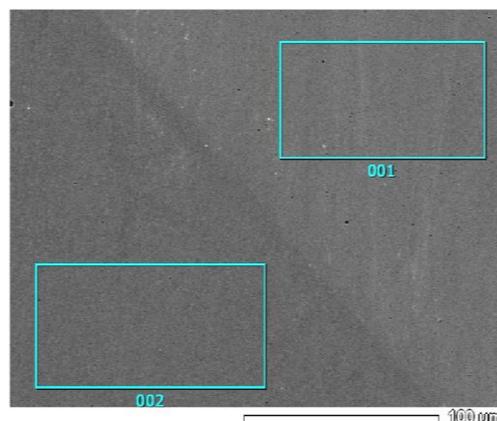
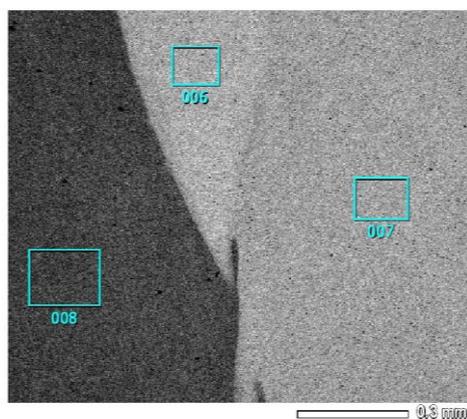


а)



б)

Рис. 1.13. Макроструктура образца №23г: а - начало трещины; б - конец трещины [48]



Memo	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total(mass)
006	0.22	10.74	1.84	66.03	16.70	4.47	100.00
007	0.37	18.21	2.86	63.49	11.72	3.35	100.00
008	0.26		0.72	99.02			100.00

Memo	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total(mass%)
001	0.27	11.41	2.09	64.63	16.94	4.65	100.00
002	0.36	0.24	0.93	98.47			100.00

а) б)

Рис. 1.14. Исследование зоны сплавления разнородного сварного соединения  
а - начало трещины; б - конец трещины [48]

При металлографических исследованиях вырезанных шлифов особое внимание уделялось изучению зоны сплавления, которая включает в себя основные металлы 22К и 08Х18Н10Т, предварительную двухслойную наплавку и присущую разнородным сварным соединениям кристаллизационную прослойку [48].

Результаты исследования, представленные на рис. 1.14-1.15, позволяют определить толщину кристаллизационной прослойки: при наплавке электродом ЭА-395/9 диаметром 4 мм на сталь 22К толщина такой прослойки составляет 80...100 мкм (0,08...0,010 мм).

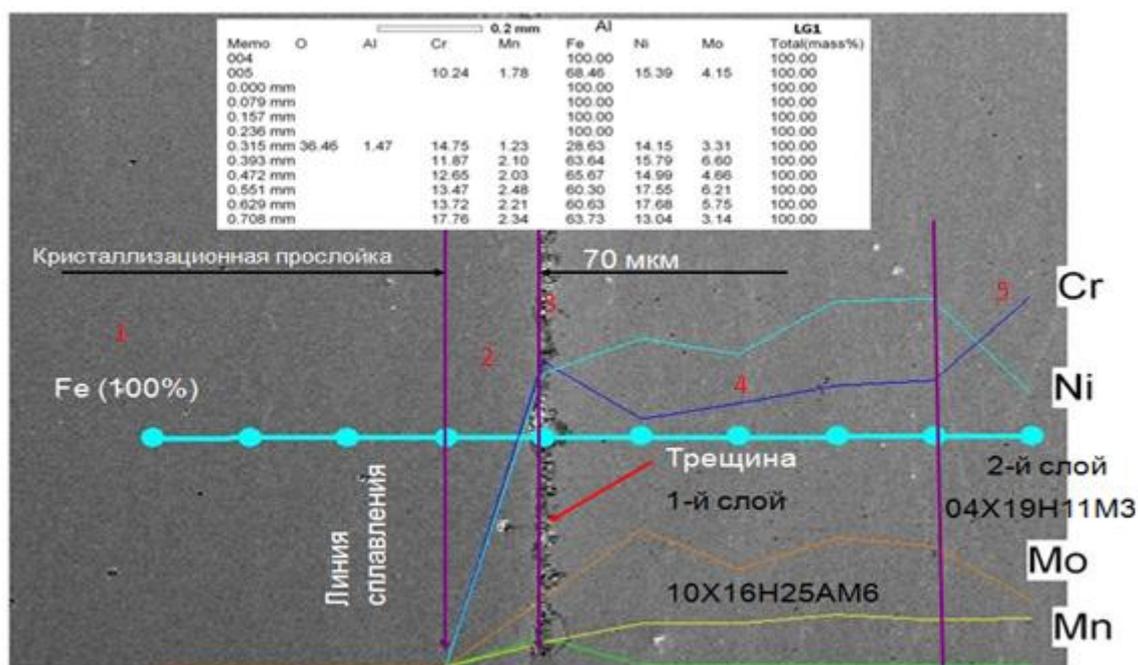
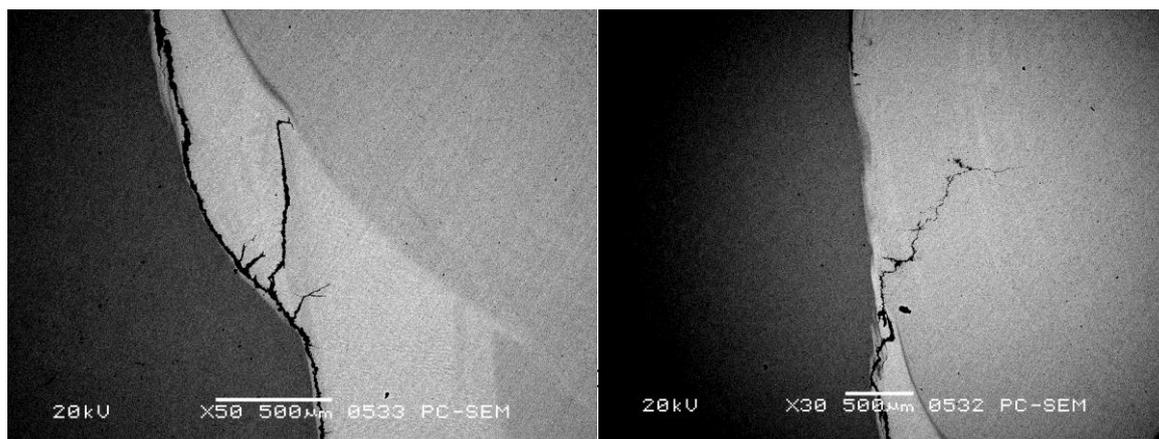


Рис. 1.15. Исследование зоны сплавления разнородного сварного соединения. Зона сплавления состоит из следующих участков: 1 - основной металл - сталь 22К; 2 - линия сплавления; 3 - кристаллизационная прослойка; 4 - первый слой предварительной наплавки, 5 - второй слой предварительной наплавки [48]

Из определения химического состава структуры зоны сплавления, по которой распространяется трещина, следует: в зоне сплавления в металле первого слоя предварительной наплавки четко выявляется зона классической кристаллизационной прослойки, ширина которой составляет 0,08...0,010 мм; в зоне распространения трещины содержание Сг составляет около 2,0...5,0%, а содержание Ni - в пределах 1,5...4,0%; в зоне кристаллизационной прослойки выявляются зоны повышенной твердости, которые могут быть классифицированы как структурные включения игольчатого мартенсита [48].

**Исследование микроструктуры.** Металлографический анализ микроструктуры представленных образцов на шлифах в плоскости поперечного сечения СС, исследование методами сканирующей электронной микроскопии, а также методом микрорентгеноспектрального анализа, замеры микротвердости структуры позволяют констатировать следующие особенности развития трещин [29]:

- магистральные трещины развиваются вдоль линии сплавления, в металле первого слоя наплавки, прилегающем к основному металлу на расстоянии 10...20 мкм; трещина прерывистая, окисленная, имеющая многочисленные трещинки-сателлиты, отходящие от магистральной трещины в перпендикулярном направлении (рис. 1.16 а);
- в зоне, где промежуточная наплавка в образце №23х-1 сходит на нет, магистральная трещина изменяет направление и развивается в глубь металла шва под углом  $-45^\circ$  по отношению к линии сплавления (рис. 1.16 б); при этом отчетливо прослеживается извилистый характер трещины;



а)

б)

Рис. 1.16. Общий вид характера распространения трещины:

а - распространение трещины; б - вершина трещины

- имеет место интенсивный растрав трещин (по ходу роста трещин);
- наблюдается стадийный рост трещин во времени;
- на всех шлифах магистральные трещины и сателлиты имеют ветвистое, хаотическое распространение (рис. 1.17);

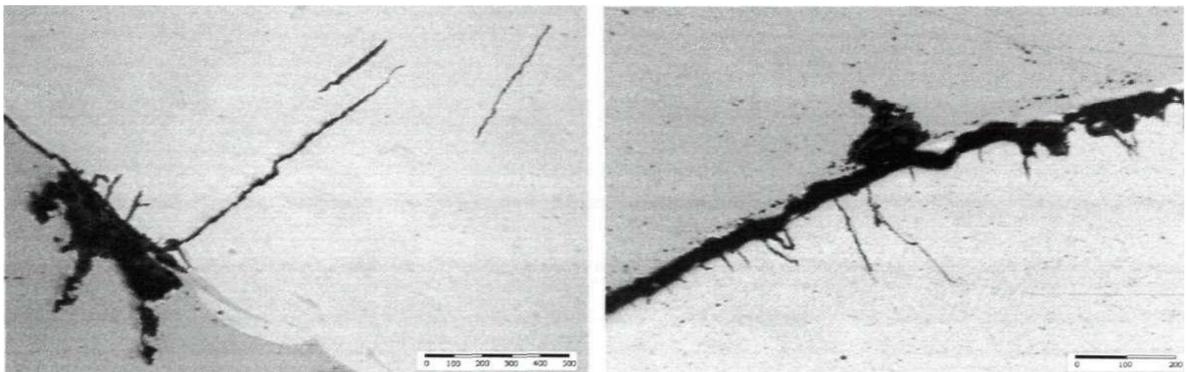
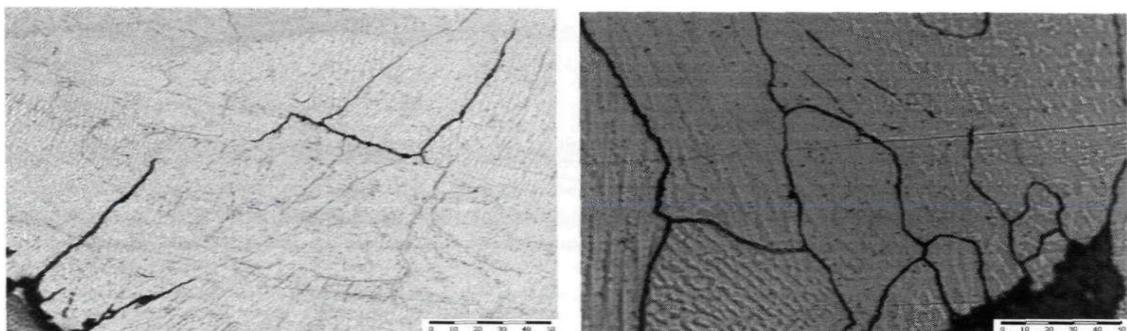


Рис. 1.17. Участки интенсивного растрова трещины (x500)

- характер развития трещин-сателлитов на шлифах после травления (рис.1.18 а) свидетельствует о том, что они распространяются перпендикулярно линии сплавления по дендритам наплавленного металла и имеют преимущественно межкристаллитный характер. Косвенным подтверждением этого предположения является вид трещин на травленых шлифах (рис. 1.18 б);



а) (x500)

б) (x1000)

Рис. 1.18. Характер развития трещин сателлитов: а - x500; б - x1000

- в отдельных микроразделах образца металлографическим анализом четко определено наличие измененного слоя, примыкающего к основному металлу (рис. 1.19) (на представленных микрофотографиях зоны темно-серого цвета). Согласно результатам определения химического состава с помощью методов микрорентгеноспектрального анализа, этот слой металла является следствием сильного перемешивания металла аустенитного шва и углеродистой стали;
- в структуре слоя с повышенной твердостью выявлены прослойки игольчатой мартенситной структуры (рис. 1.19);

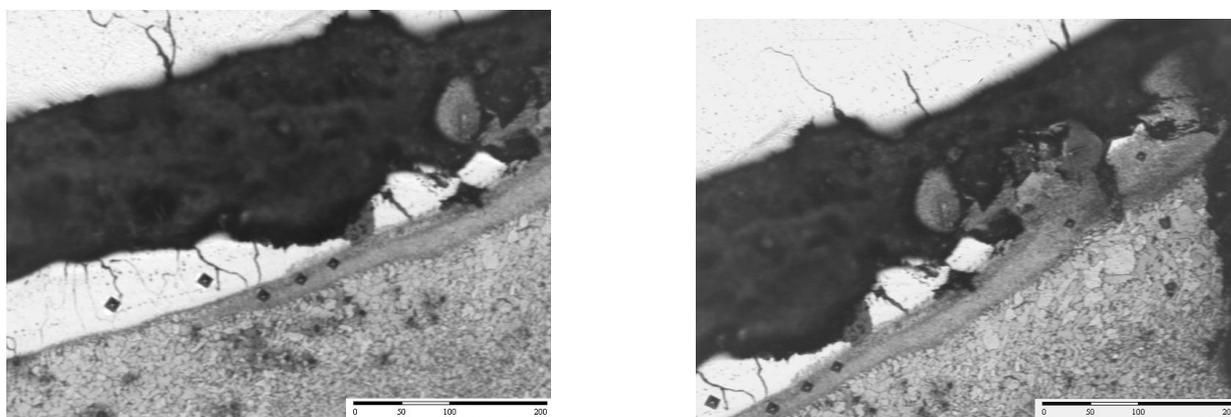


Рис. 1.19. Результаты замера микротвердости металла промежуточной наплавки и слоя измененного химического состава в образце №23х-1

Сложные физико-химические процессы, протекающие, как в процессе формирования сварочной ванны исследуемого шва, так и в ходе эксплуатации этого сварного соединения в условиях постоянного контакта термически активированного слоя углеродистой стали 22К с агрессивной средой теплоносителя второго контура, вполне ожидаемо провоцируют исходное коррозионное повреждение незащищенного наплавкой металла ферритного класса на линии соприкосновения его с металлом первого слоя наплавки. В узкой застойной зоне между наружной поверхностью коллектора первого контура парогенератора (сталь 08Х18Н10Т) и его корпусом (сталь 22К)

существенно завышенная концентрация активных ионов хлора, натрия, меди, вымываемых из конденсаторов и изначально содержащихся в воде второго контура даже при ее регламентированном качестве, запускает механизм межкристаллитной “ножевой” коррозии металла. В ослабленном по описанному сценарию металле сварного шва знакопеременные напряжения, обусловленные разницей температурных перемещений разнородных компонентов, становятся инициатором зарождения и развития трещины на линии сплавления основного металла (перлитная сталь 22К) с металлом первого слоя наплавки (аустенитная сталь 10X16H25AM6).

Таким образом, главной причиной образования повреждений разнородного СС №23 является низкая коррозионная стойкость в сочетании со склонностью к образованию “горячих” трещин первого слоя наплавки [3].

Под воздействием знакопеременных нагрузок, возникающих при эксплуатации за счет разницы коэффициентов линейного расширения и при постоянном контакте с агрессивной средой теплоносителя в ходе длительной эксплуатации, происходит образование опасных трещин [52].

Предлагаемое выше понимание причин деградации металла композитных СС №23 достаточно убедительно подтверждается фиксируемыми данными:

- существенный временной диапазон между стартовым повреждением металла и развитием исходной трещины до выявляемых размеров (по истечении более 80% проектного срока эксплуатации);
- концентрация микротрещин, зародившихся по механизму “коррозийное растрескивание под напряжением”, на линии сплавления разнородных металлов и их слияние в канальную магистральную трещину (наглядно демонстрируется на шлифах темплетов);
- существенные изменения химического состава металлов в зоне сплавления: декарбонизация (выпадение карбидов вследствие высокотемпературного отпуска наплавленного металла), очаговый

растрав углеродистой стали, гальванический вынос нестабилизированных элементов (Cr, C, Ni) и их вклинивание в разнородные металлы в зоне сплавления;

- наличие в двухкомпонентной области сварного соединения (основной металл и металл первого слоя наплавки) микрон зон различной твердости (перлит, мартенсит, аустенит), являющихся провокатором зарождения сателлитных микротрещин по границам дендритов;
- химический состав отложений в застойной зоне “карманов”, содержащих источники агрессивных активных ионов (хлор, медь, окислы железа).

#### **1.6. Динамика обнаружения повреждений разнородных сварных соединений приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов ПГВ-440**

Первые тревожные сведения течи из сварных швов парогенераторов ВВЭР-1000 появились в 1998-2000 гг., но это считалось особенностью этих парогенераторов, и для ПГ ВВЭР-440 российские нормы оставались неизменными. Только в 2007 г., после появления этих проблем на ПГ ВВЭР-440 (по результатам эксплуатационного УЗК), российские нормы рекомендуют контроль методикой механизированного УЗК этих сварных швов. При этом аттестованная методика механизированного УЗК (“Эхо-пульс” (PEUT)) в России применяется только с 2010 г. История ремонта этих сварных швов началась также с 2007 г. (устранение течи из сварного шва парогенератора ВВЭР-1000). В настоящее время в России принят следующий подход к данной проблеме:

- ежегодный контроль швов аттестованной методикой УЗК, уточнение размеров индикаций, определение фактической скорости роста;

- выполнение упредительного ремонта швов согласно графику и исследование металла вырезанных участков для выявления причин появления дефектов и их развития;
- совершенствование ремонтной процедуры по результатам исследований.

Отношение ААЭС к данной проблеме с самого начала было максимально серьезным. Уже в 2003 г. по инициативе ААЭС был выполнен экспертный контроль (механизированный ультразвуковой) сварных швов на всех шести ПГ (всего 12 таких швов). Контроль был выполнен специалистами ИЯИ Ржеж (Чехия) по стандартной методике УЗК “Эхо-пульс” (PEUT – the Pulse-Echo technique using SIROCO=SUMIAD UT system) в рамках проекта МАГАТЭ ARM/4/004. В результате контроля были выявлены индикации на всех швах, но их размеры были оценены ниже уровня регистрации, а сами индикации классифицировались как геометрические флуктуации.

В связи с этим актуальной задачей является анализ и систематизация выявленных повреждений, определение характера и причин их образования, а также разработка мероприятий по предотвращению образования повреждений и их устранению.

### **1.7. Выводы и конкретизация задач исследования**

Проблемы надежной и безопасной эксплуатации одного из важнейших элементов реакторной установки – парогенераторов обуславливаются необходимостью обеспечения определенных регламентированных условий: целостность теплообменных трубок; пределы допустимой теплонапряженности и теплообменных показателей; водно-химический режим теплоносителей первого и второго контура; целостность корпуса парогенератора.

Именно целостность корпуса парогенератора, в конечном итоге, и является целью и задачей предлагаемого исследования, поскольку

многолетними наблюдениями за всю историю эксплуатации (несколько тысяч реактор/часов) однозначно определен единственный слабый узел корпусов парогенераторов – композитное сварное соединение корпуса с коллектором первого контура (СС №23 для парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440).

Задача практически сводится к обеспечению целостности этого СС – своевременному выявлению деградационных процессов, оценке текущего состояния (величины повреждений), прогнозированию временных границ безопасной эксплуатации (сроков достижения предельного состояния), определение и реализация компенсирующих и профилактических мер, обеспечивающих восстановление и/или поддержание исходных проектных кондиций данного узла ПГ.

Успешное решение обозначенной проблемы предполагает четкое понимание конструкционных особенностей СС №23 и условий эксплуатации, а также обоснованную оценку возможного негативного воздействия этих особенностей на сохранность исходных проектных характеристиках данного узла и, тем самым, на фактическое текущее состояние корпуса ПГ в целом.

Обобщенно эти особенности сводятся к следующим:

- сложная геометрия, что наиболее существенно, многокомпонентность сварного соединения (в узле присутствуют пять различных металлов, пять границ их сплавления, а также микрзоны частичного взаимопроникновения разнородных металлов);
- наличие в сварном соединении микрзон с компонентами различной твердости (перлит, феррит, мартенсит, аустенит);
- постоянный контакт внутренней поверхности (корня шва) сварного соединения с агрессивной средой застойной зоны “карманов”;
- образование “гальванических пар” на линии соприкосновения основного металла (перлитная сталь 22К) и металла первого слоя наплавки (аустенитная сталь 10X16H25AM6);

- выявление средствами неразрушающего контроля и подтверждение в ходе ремонтных работ наличие магистральных трещин, зарожденных на внутренней поверхности сварных соединений и развивающихся в толще СС в направлении к наружной поверхности, достигающих размеров, приближающихся к критическим;
- выявление средствами неразрушающего контроля и подтверждение в ходе ремонтных работ коррозионного повреждения внутренней поверхности (корня) сварного соединения по всему периметру на глубину до 7 мм (исходная позиция для зарождения трещины);
- достаточно высокий температурный градиент в зоне соприкосновения металла сварного шва ( $255^{\circ}\text{C}$ ) с теплоносителем второго контура, питательной водой ( $223^{\circ}\text{C}$ ) при существенной разнице коэффициентов температурного расширения металлов патрубка корпуса парогенератора (сталь 22К), первого слоя наплавки (сталь 10Х16Н25АМ6), второго слоя наплавки (сталь 04Х19Н11М3) и коллектора первого контура парогенератора (сталь 08Х18Н10Т).

Начиная с 2007 года в разнородных сварных соединениях приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов ПГВ - 440 №23 были выявлены и продолжают выявляться на ААЭС, НВ АЭС, Кольской АЭС, а также на АЭС Дукованы (Чехия) кольцевые трещины в зоне сплавления перлитного и аустенитного металлов. Исходя из анализа литературных данных и опыта эксплуатации атомных энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-440, целью данной работы является поиск обоснованных предложений по повышению эксплуатационной надежности разнородных сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубкам парогенераторов реакторных установок ВВЭР-440 (шов №23).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить влияние условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440;
- разработать и обосновать оценку критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных швов №23 патрубков Ду-1100 ПГВ-4с;
- оценить остаточный ресурс узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов ВВЭР-440.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКИХ И ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТА СВАРНЫХ ШВОВ ПЕРЕХОДНОГО КОЛЬЦА И ПАТРУБКА ДУ-1100 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ВВЭР-440**

### **2.1. Методика экспериментального исследования**

В рамках экспериментального исследования выполнялся контроль сварного соединения в 2014 г. на ААЭС по “Методике автоматизированного ультразвукового контроля (МА5-АЭ1-ПК0Б/9-К-08 с изм № 1) сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением системы АВГУР 5.2”.

Также дополнительно проводился контроль по проекту “Методики ультразвукового контроля (Х-32) сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением технологии фазированных решёток”,

предназначенному для проведения аттестационных испытаний в течение 2018 г. [53].

**Основные параметры методики.** Система АВГУР 5.2 представляет собой измерительный прибор, предназначенный для измерения параметров дефектов (тип, размеры, координаты) в основном металле и сварных соединениях трубопроводов.

Областью применения системы АВГУР 5.2 является автоматизированный ультразвуковой контроль труб различных габаритов и толщин, используемых при строительстве и эксплуатации трубопроводов в таких отраслях промышленности, как трубопроводный транспорт, атомная и тепловая энергетика и др.

Система АВГУР 5.2 позволяет:

- выявлять дефекты, несплошности и неоднородности материала (трещины, поры, расслоения, включения и т.д.);
- измерять координаты положений дефектов и их размеры.

Система предназначена для эксплуатации в помещениях при значениях рабочих температур от плюс 1°С до плюс 35°С и относительной влажности воздуха до 80%.

Ниже приведены характеристики, описывающие назначение методики, основные параметры контроля, принципы анализа данных [59-62].

1. Контроль проводился с целью обнаружения и определения параметров эксплуатационных и технологических несплошностей в сварном соединении, включая его корень, линию сплавления, а также околошовную зону. При проведении контроля определяются следующие параметры несплошностей - эквивалентная площадь или амплитуда эхо-сигнала от несплошности относительно браковочного уровня, место их расположения вдоль СС,

протяженность, глубина залегания и высота. Погрешность измерения высоты несплошности составляет  $\pm 6$  мм в 95%-ом доверительном интервале.

2. Контроль, проводимый по настоящей методике, позволяет обнаруживать трещины, непровары, несплавления и включения в наплавленном металле сварного шва и околошовной зоне шириной 20 мм от линии сплавления. Не гарантируется обнаружение несплошностей, расположенных вне зоны прозвучивания под внешней поверхностью валика, усиленного на глубине до 10 мм. Размер области прозвучивания может уменьшиться при наличии ремонтных выборок в околошовных зонах сварного соединения.

3. Контроль, проводимый по настоящей методике, обеспечивает выявление несплошностей с эквивалентной площадью более  $15 \text{ мм}^2$  и условной протяженностью более 15 мм вдоль оси сварного соединения.

4. Для определения геометрических размеров несплошностей проводилась когерентная обработка А-сканов методом вычислительной многочастотной акустической голографии (FT SAFT) [59]. Путем анализа восстановленных голографических изображений определяются геометрические размеры и координаты местоположения несплошностей.

5. Для повышения надежности обнаружения несплошностей при проведении АУЗК по данной методике используются различные углы ввода продольных и сдвиговых волн (двухмодовая методика АУЗК) и схемы прозвучивания.

Перечень схем контроля и типов пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) которые были использованы в рамках экспериментального исследования приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

ПЭП	Центральная частота, $\pm$ МГц	Тип волны	Сторона контроля	Угол ввода, °	Обозначение схемы контроля
-----	--------------------------------	-----------	------------------	---------------	----------------------------

2L1.8R45	1,8±0.2	L	перлит	45±3	NL45
2L1.8R55	1,8±0.2	L	перлит	55±3	NL55
2L1.8R45	1,8±0.2	L	аустенит	45±3	PL45
2L1.8R55	1,8±0.2	L	аустенит	55±3	PL55
L1.8R75 (2H1.8R)	1,8±0.2	L	перлит	75±3 (головная волна)	NL75
L1.8R75 (2H1.8R)	1,8±0.2	L	аустенит	75±3 (головная волна)	PL75
S2.5D45	2,5±0.3	S	перлит	45±3	NS45

Перечень схем контроля МА5-АЭ1-ПК0Б/9-К-08 с изм № 1 [63]

Для настройки чувствительности применяются настроечные образцы, выполненные по штатной монтажной технологии или по определенной технологии ремонта [64].

На рис. 2.1 поясняется принцип измерения высоты несплошностей визуализированным методом FT-SAFT изображениям.

Согласно методике, при анализе данных для измерения геометрических параметров несплошностей фиксируются все несплошности, высота которых равна или превышает 7 мм от данной поверхности сварного шва [65, 66].

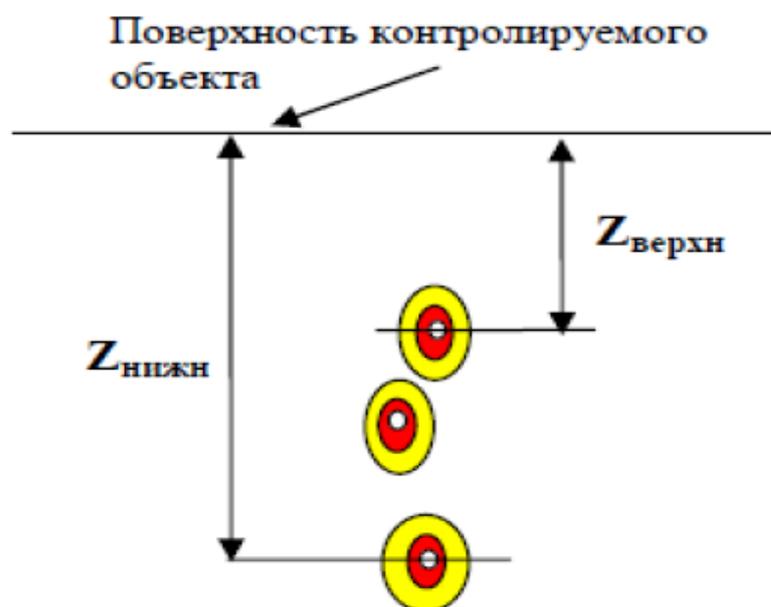


Рис. 2.1. Принцип определения высоты несплошностей плоскостного типа

### 2.1.1. Система АВГУР 5.2

Для выполнения экспериментальных исследований по АУЗК СС Ду-1100 использовалась система автоматизированного ультразвукового контроля АВГУР 5.2, включающая в свой состав основные приборы и оборудование: блок системный БС3.А5.2ПК-У; сканер СК.426Т412162-2; трек Ду1100 с ремнем Т1225; блок выносной БВ6.А5.212160; ПЭП 2Л1.8R55; ПЭП 2Н1.8R; ПЭП 2Л1.8R75; ПЭП Л1.8D45; ПЭП 2Л1.8R45; ПЭП Л1.8D55; ПЭП Л1.8D70; ПЭП S1.8D45;

Система АВГУР 5.2 позволяет осуществлять дистанционный контроль при удалении оператора от объекта контроля на расстояние до 68 мм [63, 64].

Сканер представляет собой устройство для перемещения ПЭП по поверхности патрубка Ду-1100 и переходного кольца. ПЭП перемещаются вдоль и поперек сварного соединения (сканирование). Сканер включает в себя приводы X (движение в направлении, перпендикулярном относительно оси шва) и Y (движение вдоль оси шва), направляющие прижимов ПЭП, прижимы ПЭП (установочные места ПЭП) и блок электроники сканера. Сканер устанавливается на локальный трек в виде полосы и крепится на объекте контроля магнитными опорами и натяжным ремнем (рис. 2.2) [65-67].

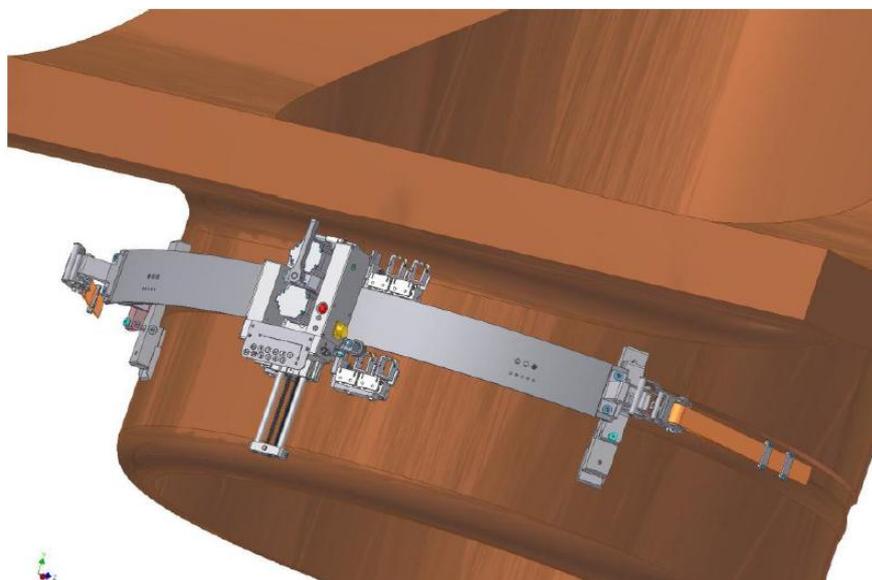


Рис. 2.2. Размещение сканера АВГУР 5.2 на объекте контроля

### 2.1.2. Система X-32

Система Harfang X-32 (далее система X-32) представляет собой прибор, предназначенный для измерения параметров дефектов (их типа, размеров, координат) в основном теле металлических и полимерных труб, а также в сварных и паяных соединениях труб [68, 69].

Областью применения системы X-32 является контроль труб различных габаритов и толщин, используемых при строительстве и эксплуатации водопроводов и теплотрасс в таких отраслях промышленности, как трубопроводный транспорт, атомная промышленность, энергетика и др. [70].

Основные преимущества технологии фазированных решеток системы X-32:

- скорость работы – диагностика с помощью X-32 с линейным сканированием обычно на порядок быстрее, чем обычное растровое сканирование с применением одного датчика;
- гибкость – с помощью единственной решетки можно провести диагностирование целого ряда различных образцов с применением различных процедур, используя файлы электронной настройки;
- механическая надежность – меньшее количество движущихся частей повышает надежность системы диагностики;
- повышение выявляемости неориентированных дефектов – фокусированный луч увеличивает отношение сигнал-шум. Наличие ряда А-сканов, сгруппированных в сектор с определенным угловым разрешением, увеличивает вероятность обнаружения дефектов.

Для выполнения экспериментальных исследований по X-32 СС Ду-1100 использовалась система ультразвукового контроля на фазированных решетках

Harfang X-32 № X322007139 в составе [71, 72]: прибор Harfang X-32; призма X-32-35°-R-IL42; призма X-32-20°-426-IL42; датчик пути ИП-150-ПЛ.Р.ДП.1.

## 2.2. Методика расчета критических и допустимых размеров дефекта

Расчет критических и допустимых размеров дефекта, на достижение которых направлены описанные далее методики, заключается в том, что они позволяют произвести оценку с реальными дефектами после контроля определить фактический уровень надежности и безопасности.

Оценка допустимой глубины дефекта выполнена в соответствии с процедурой American Society of Mechanical Engineers (ASME, часть C-6000) на основе опыта использования сталей ВВЭР (т.е. был опущен критерий отбора) [73-79].

В связи с тем, что могут появиться несплошности, задача состоит в том чтобы разработать методологию расчетов учитывающих дефектность.

Критерий приемки для кругового дефекта определен в виде

$$\sigma_b \leq S_c, \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  – напряжение при изгибе по первому контуру;  $S_c$  – допустимое напряжение.

Допустимое напряжение определяется в виде

$$S_c = \frac{1}{c} \left| \frac{\sigma_b^c}{\tau} - \sigma_\varepsilon \right| - \sigma_m \left[ 1 - \frac{1}{\tau c} \right], \quad (2)$$

где  $c$  и  $\tau$  – коэффициенты безопасности для напряжения изгиба;

$\sigma_\varepsilon$  – предел текучести, МПа;  $\sigma_b^c$  – напряжение при изгибе по второму контуру, МПа;  $\sigma_m$  – мембранные напряжения в первом контуре, МПа.

Коэффициенты безопасности  $c$  и  $\tau$  представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Коэффициенты безопасности

Коэффициенты	Группа А	Группа В	Группа С	Группа D
$S_{Fb}$	2,7	2,4	1,8	1,3
$S_{Fm}$	2,3	2	1,6	1,4

Значения коэффициента Z рассчитаны по формуле

$$Z = 1,35 \left[ 1, \right] \quad (3)$$

где  $D_{out}$  - внешний диаметр в метрах, вместо номинального диаметра.

Значения коэффициента A рассчитаны по формуле

$$A = \sqrt[4]{0,125 \frac{R}{t} - 0,25}, \quad (4)$$

где R - средний радиус трубы, мм; t - толщина трубной стенки, мм.

Предел текучести определен по формуле

$$\sigma_b^c = \frac{2\sigma_f}{\sqrt{3}} \left( 2 - \frac{a}{t} \right) \sin \beta, \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{a}{t} \left( 1 - \frac{a}{t} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right). \quad (6)$$

Осевая нагрузка в первом контуре, вызванная давлением в первом контуре, может быть определена следующим образом [75]:

$$F_{lid,prim} = \pi \cdot \left( \frac{D_{in,cool}}{2} \right)^2 \cdot (P_{prim} - P_{sec}), \quad (7)$$

где  $D_{in,cool}$  - внутренний диаметр внутреннего коллектора первого контура, мм;  $P_{prim}$  - давление первого контура, МПа;  $P_{sec}$  - давление второго контура, МПа.

Осевая нагрузка в первом контуре, вызванная давлением во втором контуре, может быть определена следующим образом:

$$F_{lid,sec} = \pi \cdot \left( \left( \frac{D_{in}}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{in}-2h}{2} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где  $D_{in}$  - внутренний диаметр коллектора, мм;  $h$  - пространство между самим коллектором и сварным швом коллектора, мм.

Общая аксиальная нагрузка первого контура определяется выражением

$$F_{ax} = F_{lid,prim} + F_{lid,sec} + |P_{dw} \quad (9)$$

где  $F_{lid,prim}$  - осевая нагрузка собственного веса, Н;  $F_{lid,sec}$  - осевая нагрузка внутреннего давления, Н;  $P_{dw}$  - осевая нагрузка сейсмичности, Н.

Момент изгиба по первому контуру с учетом момента кручения рассчитывается по формуле [79]

$$M_b = \sqrt{(|M_{j,dw} + M_{j,ip}| + M_{j,seism})^2}, \quad (10)$$

где  $M_{dw}$  - нагрузка собственного веса, Нм;  $M_{ip}$  - нагрузка внутреннего давления, Нм;  $M_{seism}$  - нагрузка сейсмичности, Нм.

Момент изгиба по второму контуру с учетом момента кручения рассчитывается по формуле [79]

$$M_g = \sqrt{\sum M_{j,\epsilon}^2}, \quad (11)$$

где  $M_{j,\epsilon}$  - нагрузка теплового расширения, Нм.

Мембранные напряжения в первом контуре могут быть определены по формуле

$$\sigma_m = \frac{F_{ax}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t}. \quad (12)$$

Напряжение при изгибе по первому контуру рассчитывается по формуле

$$\sigma_b = \frac{M_b}{\pi R^3} \cdot \quad (13)$$

Напряжение при изгибе по второму контуру рассчитывается по формуле

$$\sigma_e = \frac{M_e}{\pi R^3} \cdot \quad (14)$$

### 2.3. Метод пластического шарнира

Критический размер дефекта – это такой размер, при достижении которого происходит мгновенное разрушение конструкции.

Допустимый в эксплуатации размер несплошности не должен превышать такого значения, которое равно критическому размеру, уменьшенному на соответствующие коэффициенты запаса прочности [80-82].

Например, для трубопровода в рабочем режиме, как правило, характерно вязкое состояние металла. Дефект можно схематизировать так, как показано на рис. 2.3.

Для цилиндрических оболочек с несплошностями, ориентированными в кольцевом направлении, критические размеры дефектов  $a_c$  и  $c_c$  находят по формуле

$$\sigma_f = \frac{2 \cdot R \left[ 2 \cdot \sin \left( 0.5 \cdot \left( \pi - n_a \cdot y \cdot n_\varphi \cdot x - \pi \cdot \frac{\sigma_m}{R} \right) \right) - n_a \cdot y \cdot \sin(n_\varphi \cdot x) \right]}{\pi}, \quad (15)$$

где  $\sigma_f$  - изгибное напряжение;  $R$  - критерий разрушения в вязкой области;  $R = 1.2 * R_{p0,2}$ ;  $R_{p0,2}$  - предел текучести материала цилиндра, МПа;  $y = a/S$  - относительная глубина трещины критического размера;  $a$  - глубина трещины, мм;  $S$  - толщина стенки цилиндра, мм;  $x = C/R$  - половина длины трещины критического размера;  $C$  - половина длины трещины, мм;  $n_a$  - коэффициент запаса прочности по глубине трещины (для критических размеров равен 1);  $n_\varphi$  - коэффициент запаса прочности по длине трещины (для критических размеров равен 1).

Коэффициенты запаса прочности:

для НУЭ:  $n_a = 3, n_\varphi = 2;$

для ГИ:  $n_a = 2, n_\varphi = 2;$

для НУЭ+МРЗ:  $n_a = 1, n_\varphi = 2.$

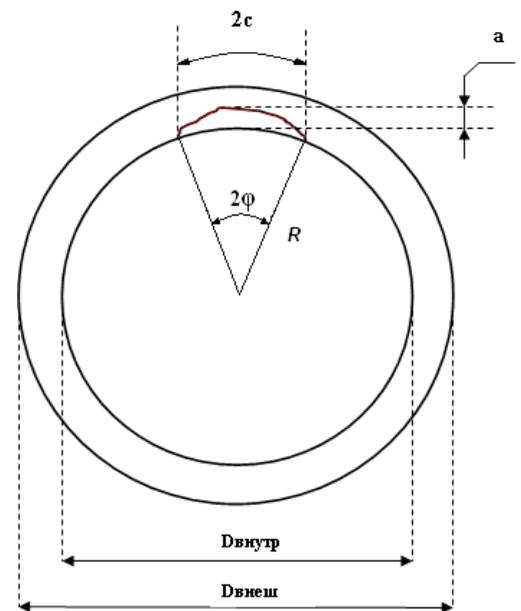


Рис. 2.3. Схематизация несплошности

## 2.4. Метод J-интеграла

$J$ -интегральный метод является широко используемым методом на основе энергетического баланса [83-86]. Он применяется для оценки состояния напряженного твердого тела с трещиной.

$J$ -интеграл определяется выражением

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - T_i \frac{du_i}{dx} ds \right), \quad (16)$$

где  $\Gamma$  - замкнутый контур, который нужно обойти против часовой стрелки, окружающей в напряженном твердом теле некоторую область;  $T$  - вектор напряжений, перпендикулярных к контуру  $\Gamma$ , и направлен во внешнюю сторону;  $T_i = \sigma_{ij} n_j$  - перемещение в направлении оси  $x$ ;  $ds$  - элемент контура  $\Gamma$ ;

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{mn} d\varepsilon_{mn} - \text{модуль устойчивости (в контурных точках); связь}$$

напряжение-деформация может быть нелинейной. Координаты  $(x, y)$  трещины лежат на оси  $x$ . Если  $\Gamma$  - замкнутый контур, то  $J=0$ .

Этот метод основан на GE / EPRI методе в соответствии с NUREG/CR-6235 и модифицирован с учетом изгибающего момента и усилия фактора. Модифицированный метод описан в методических рекомендациях MP125-02-95, используемых в атомной отрасли [85].

### **ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВАРНЫХ ШВОВ ПЕРЕХОДНОГО КОЛЬЦА И ПАТРУБКА ДУ-1100 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-4с ВВЭР-440**

#### **3.1. Экспериментальное исследование сварных швов переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с**

Экспериментальные исследования сварного соединения в 2014 г. на ААЭС выполнялись по “Методике автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением системы АВГУР 5.2”. Также дополнительно проводилось исследование по проекту “Методики ультразвукового контроля сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением технологии фазированных решёток”.

Как было отмечено в первой главе отношение ААЭС к данной проблеме с самого начала было максимально серьезным. Уже в 2003 г. по инициативе ААЭС был выполнен экспертный контроль (механизированный ультразвуковой) сварных швов на всех шести ПГ (всего 12 таких швов). Контроль был выполнен специалистами ИЯИ Ржеж (Чехия) по стандартной методике УЗК “Эхо-пульс” (PEUT – the Pulse-Echo technique using SIROCO=SUMIAD UT system) в рамках проекта МАГАТЭ ARM/4/004 [87]. В результате контроля были выявлены индикации на всех швах, но их размеры были оценены ниже уровня

регистрации, а сами индикации классифицировались как геометрические флуктуации.

В период 30.09.2014 – 09.10.2014 проведено экспериментальное исследование АУЗК сварных соединений на всех коллекторах всех ПГ на энергоблоке № 2 ААЭС, в результате которого на двух швах (на “горячих” коллекторах ПГ-5 и ПГ-6) выявлены дефекты, превышающие допустимые размеры. Этот контроль был выполнен двумя методиками:

- УЗК “Эхо-пульс” (PEUT – the Pulse-Echo using SIROCO=SUMIAD UT system). Подобная методика аттестована для сварных швов российских АЭС и Армянской АЭС (эта методика применена на ААЭС и аттестована в России и в Армении);
- УЗК датчиками с фазированной решеткой (PAUT–the Phased Array technique using ZIRCON system) (эта методика применена на ААЭС впервые экспериментальным путем, методика не аттестована ни в России, ни в Армении [89]).

Основные характеристики сварного соединения:

- материал патрубка парогенератора - сталь 22К;
- наплавка на патрубке – первый слой выполнен электродами ЭА-395/9, второй слой – электродами ЭА-400/10Т;
- тип сварки - ручная электродуговая;
- сварной шов выполнен электродами ЭА 400/10У;
- разделка шва – V-образная;
- аргонодуговая подварка корня сварного шва – проволокой 04Х19Н11МЗ;
- переходное кольцо – сталь 08Х18Н10Т.

Композитные сварные швы (рис. 3.1) являются специфическими для горизонтальных ПГ российского проекта и соединяют коллекторы первого контура (нержавеющая сталь 08Х18Н10Т) с корпусами самих парогенераторов

(углеродистая сталь 22К). Швы являются частью ПГ и изготовлены на заводе (наплавка – на Ижоре, сам шов – на “ЗиО-Подольск”).

Данные о парогенераторах энергоблоков №1 и №2 ААЭС приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сведения о парогенераторах ААЭС

	№ ПГ	Регистрационный номер ПГ	Заводской номер ПГ	Год изготовления	Год ввода в эксплуатацию
Энергоблок № 1	1ПГ-5	8	7749	1975	1976
	2ПГ-1	3Р	8517	1977	1980
Энергоблок № 2	2ПГ-2	4Р	8518	1977	
	2ПГ-3	5Р	8519	1978	
	2ПГ-4	6Р	8522	1979	
	2ПГ-5	7Р	8521	1979	
	2ПГ-6	8Р	8520	1978	

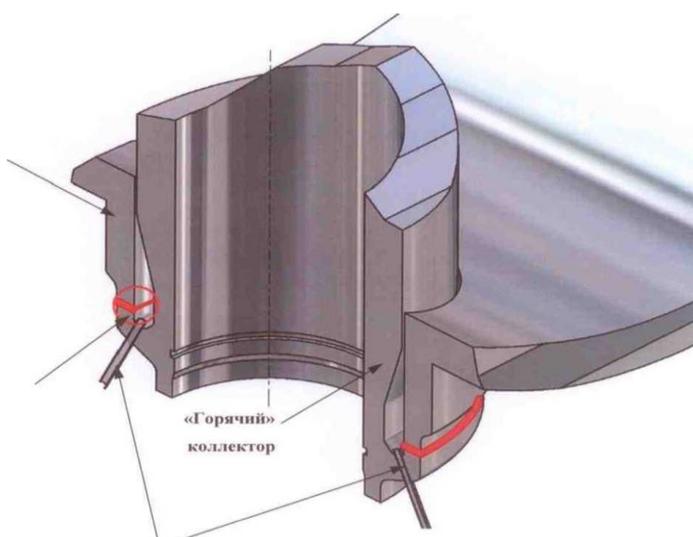


Рис. 3.1. Сварной шов: внешний диаметр – 1245 мм, внутренний диаметр – 1098 мм, толщина шва (стенки) – 73,5 мм

В табл. 3.2 представлены результаты УЗК, выполненного в 2014 г. по двум методикам: “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фазированная решетка” (PAUT).

Таблица 3.2

Максимальные размеры выявленных индикаций (максимумы по глубине, 2014 г. “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фазированная решетка” (PAUT)) [89]

№ п/п	Обозначение парогенератора		“Эхо-пульс” (PEUT)		“Фаз. решетка” (PAUT)	
			длина, мм	глубина, мм	длина, мм	глубина, мм
1	2ПГ-1	“холодный” коллектор	288	27,5	595	10
2		“горячий” коллектор	648	22,8	329	15,4
3	2ПГ-2	“холодный” коллектор	944	24,6	515	13,1
4		“горячий” коллектор	393	25,2	300	16,7
5	2ПГ-3	“холодный” коллектор	210	25,6	217	9,1
6		“горячий” коллектор	227	22,4	456	14
7	2ПГ-4	“холодный” коллектор	657	26,5	1160	12,7
8		“горячий” коллектор	327	27,2	68	14
9	2ПГ-5	“холодный” коллектор	824	24	678	11,3
10		“горячий” коллектор	748	27,5	88	<b><u>46,6</u></b>
11	2ПГ-6	“холодный” коллектор	506	26,3	727	12,2
12		“горячий” коллектор	116	<b><u>32,9</u></b>	77	<b><u>48,4</u></b>

В табл. 3.3 представлены результаты УЗК, выполненного по одной и той же методике (PEUT) дважды за 11 лет (в 2003 и 2014 гг.) для возможности оценки изменений этих индикаций за данный период.

Таблица 3.3

Максимальные размеры выявленных индикаций (максимумы по глубине, 2003 г. “Эхо-пульс” (PEUT)) [89]

№ п/п	Обозначение парогенератора		“Эхо-пульс” (PEUT)		Скорость (за 11 лет)	
			длина, мм	глубина, мм	длина, мм	глубина, мм
1	2ПГ-1	“холодный” коллектор	200	26,8	8,8	0,08
2		“горячий” коллектор	687	22,7	-3,7	0,01
3	2ПГ-2	“холодный” коллектор	521	19,2	<b><u>42,3</u></b>	0,5
4		“горячий” коллектор	431	22,7	-3,8	0,25
5	2ПГ-3	“холодный” коллектор	321	24,5	-11,1	0,11
6		“горячий” коллектор	348	23,0	-12,1	0,06
7	2ПГ-4	“холодный” коллектор	784	26,5	-12,7	0
8		“горячий” коллектор	527	27,2	<b><u>20</u></b>	1,15
9	2ПГ-5	“холодный” коллектор	408	22,2	<b><u>41,5</u></b>	-0,18
10		“горячий” коллектор	182	27,1	<b><u>56,6</u></b>	0,04
11	2ПГ-6	“холодный” коллектор	227	25,1	<b><u>27,9</u></b>	0,06
12		“горячий” коллектор	227	25,1	-11,1	0,78

Как видно из табл. 3.3, за 11 лет индикации изменились только в длину (в некоторых случаях даже уменьшились), глубины индикаций в швах практически остались неизменными.

## 3.2. Сравнительный анализ сварных швов переходного кольца и патрубка Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440

### 3.2.1. Парогенератор №.1, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.2 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

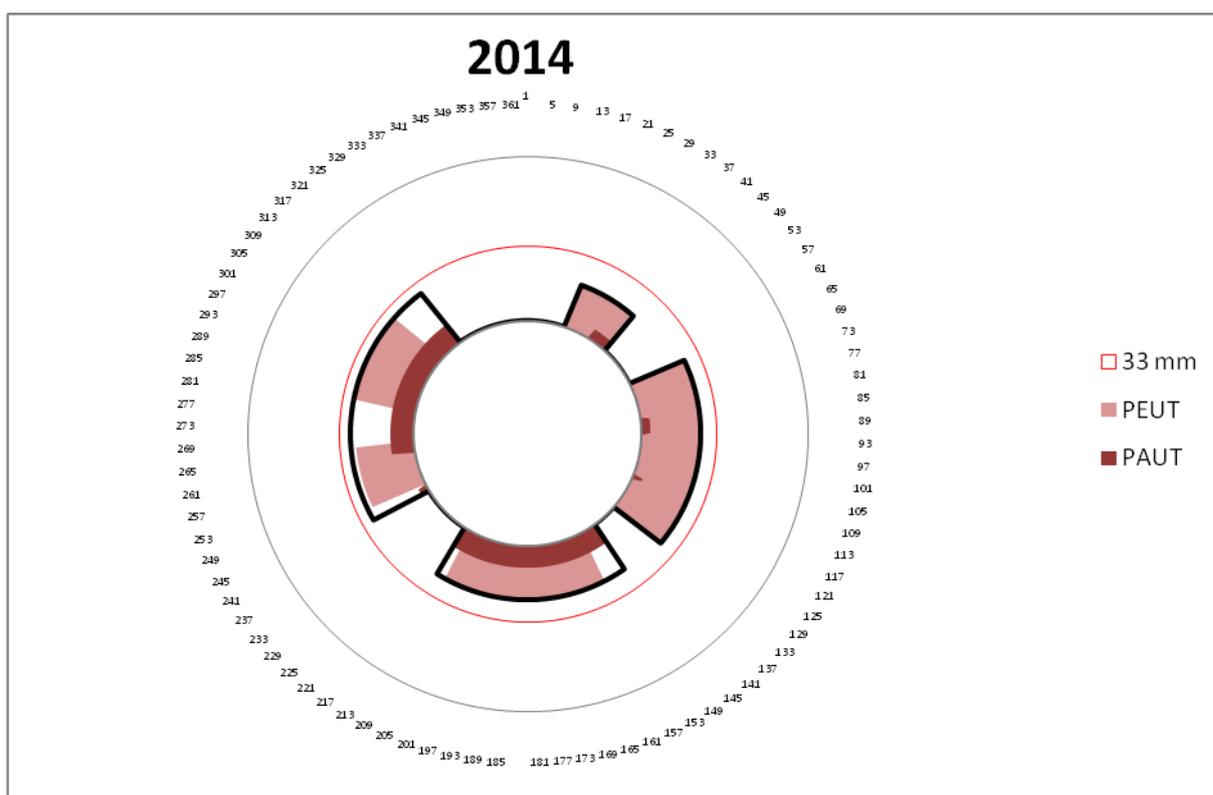


Рис. 3.2. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.4.

В табл. 3.5 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.4

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	20,51	42,14	207,6	19,83
2	65	130,94	633,0	26,16
3	145,1	213,2	653,7	23,7
4	241,4	324,2	794,8	27,51

Таблица 3.5

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	22,02	43,23	203,6	18,11
2	67,2	114,85	457,4	20,46
3	151,13	195,62	427,1	23,75
4	247,68	268,5	199,9	26,77
5	284,59	312,04	263,5	25,19

На рис. 3.3 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

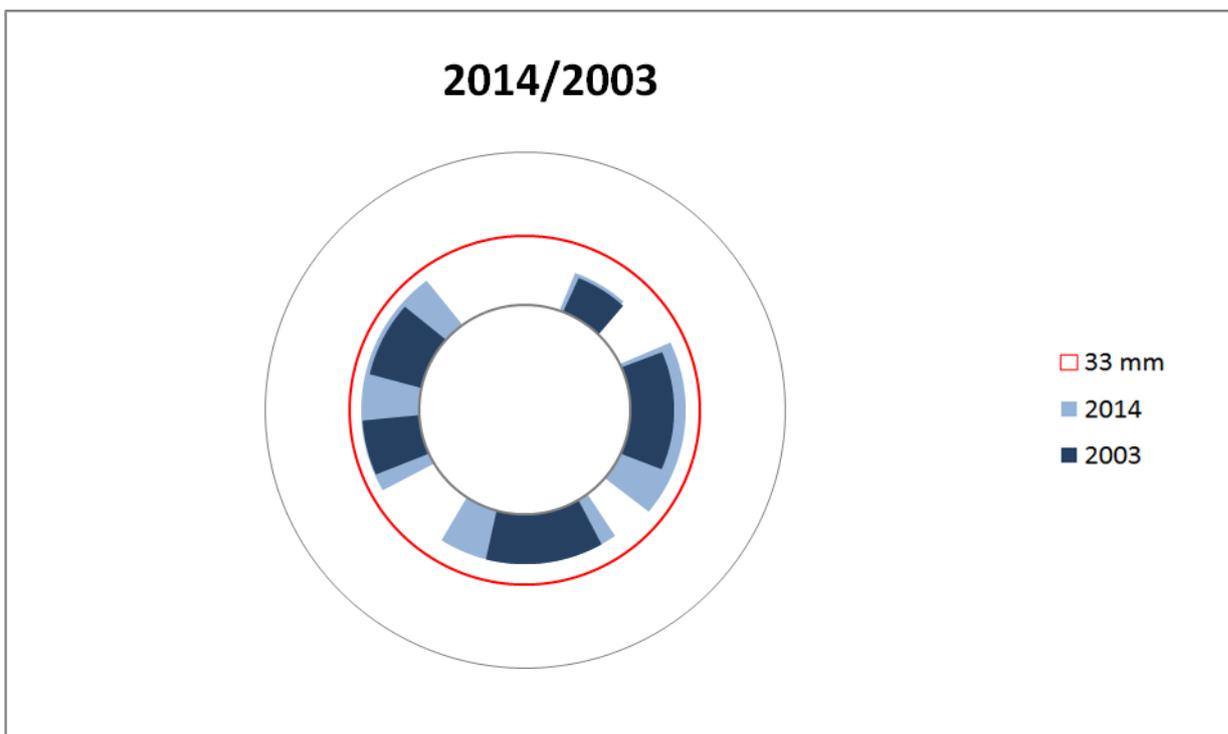


Рис. 3.3. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### **3.2.2. Парогенератор №.1, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.**

На рис. 3.4 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

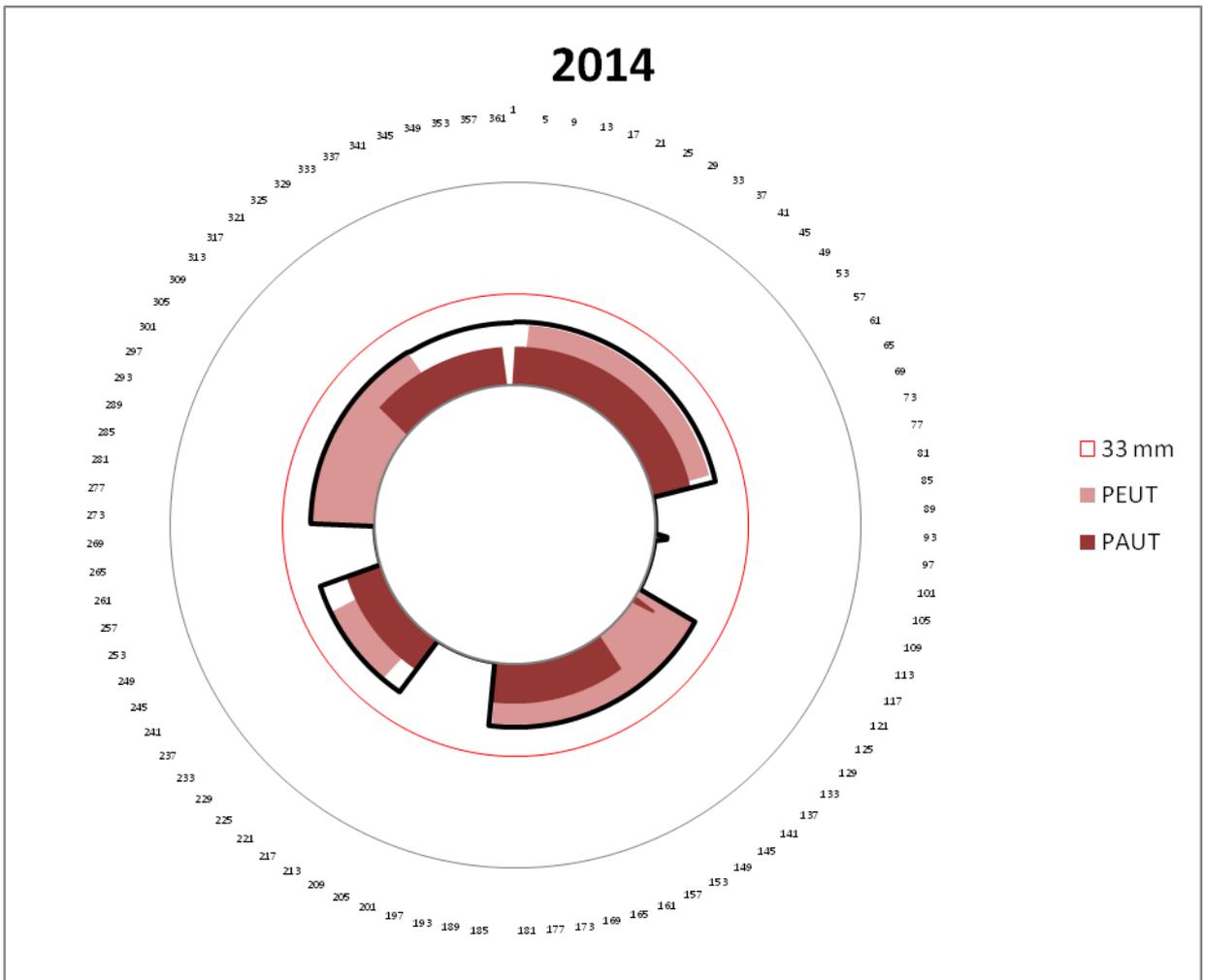


Рис. 3.4. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.6.

В табл. 3.7 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.6

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Таблица 3.7

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-88,97	78,70	1609,5	22,84
2	122,00	123,00	9,6	8,64
3	119,89	188,90	662,4	22,84
4	215,80	253,20	359,0	22,88

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	0	73,63	706,8	17,81
2	113,58	185,21	687,6	22,66
3	226,85	250,52	227,2	18,75
4	269,45	318,35	469,4	20,03

На рис. 3.5 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

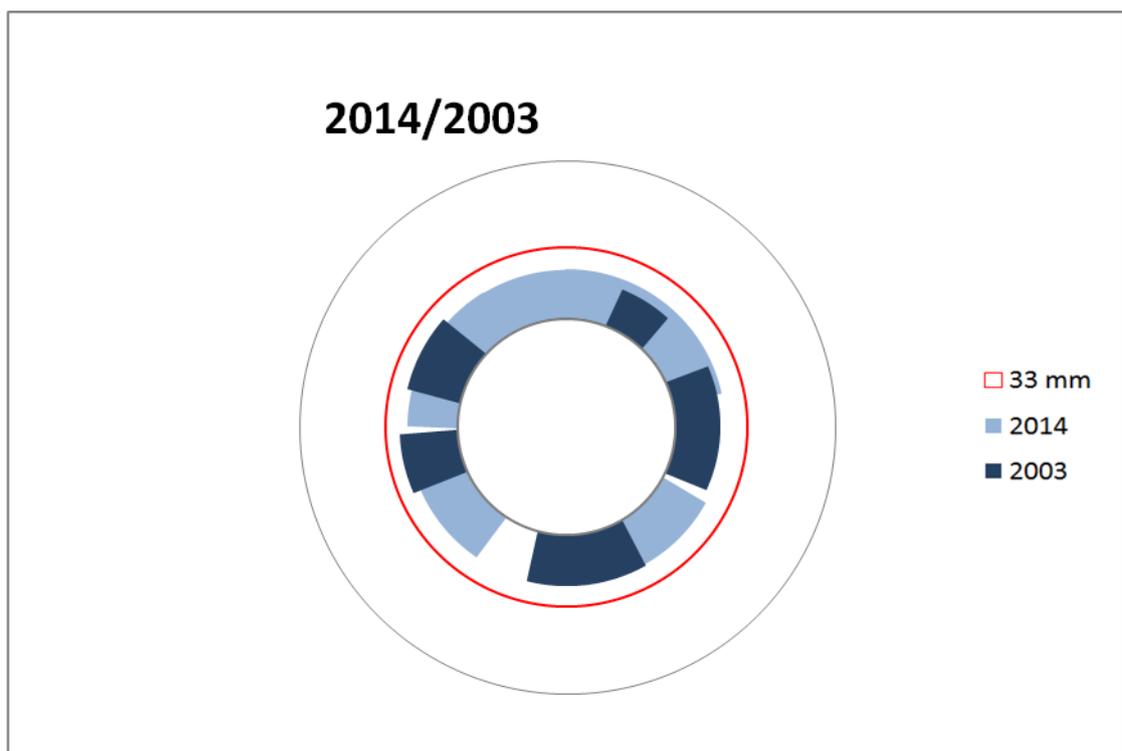


Рис. 3.5. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.3. Парогенератор №.2, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.6 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

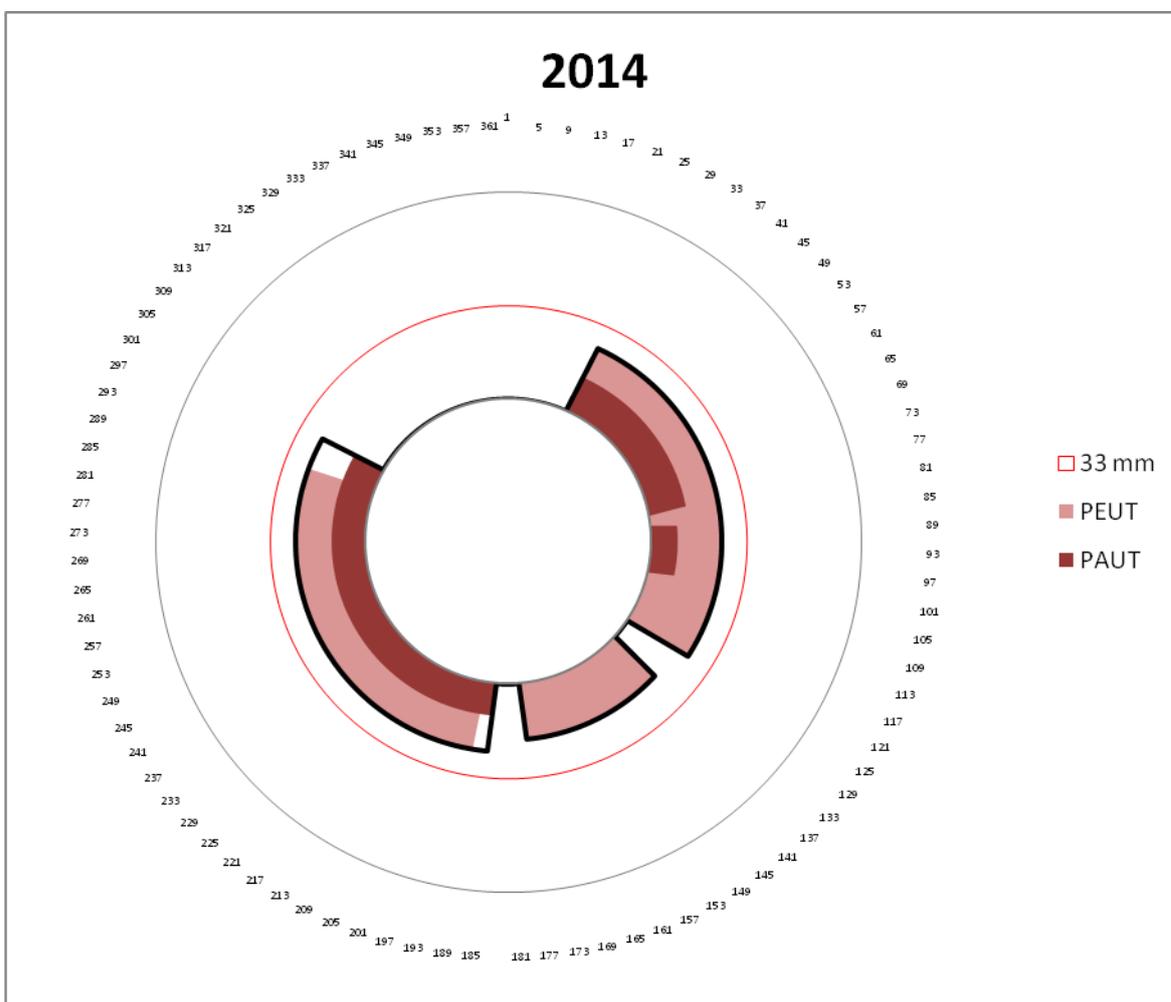


Рис. 3.6. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.8.

В табл. 3.9 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.8

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	25,44	123,82	944,4	24,59
2	133,99	175,12	394,8	16,62
3	186,20	300,30	1095,3	20,83

Таблица 3.9  
Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	25,48	79,71	520,6	19,22
2	158,58	176,42	171,2	16,54
3	187,29	240,8	513,6	16,98

На рис. 3.7 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

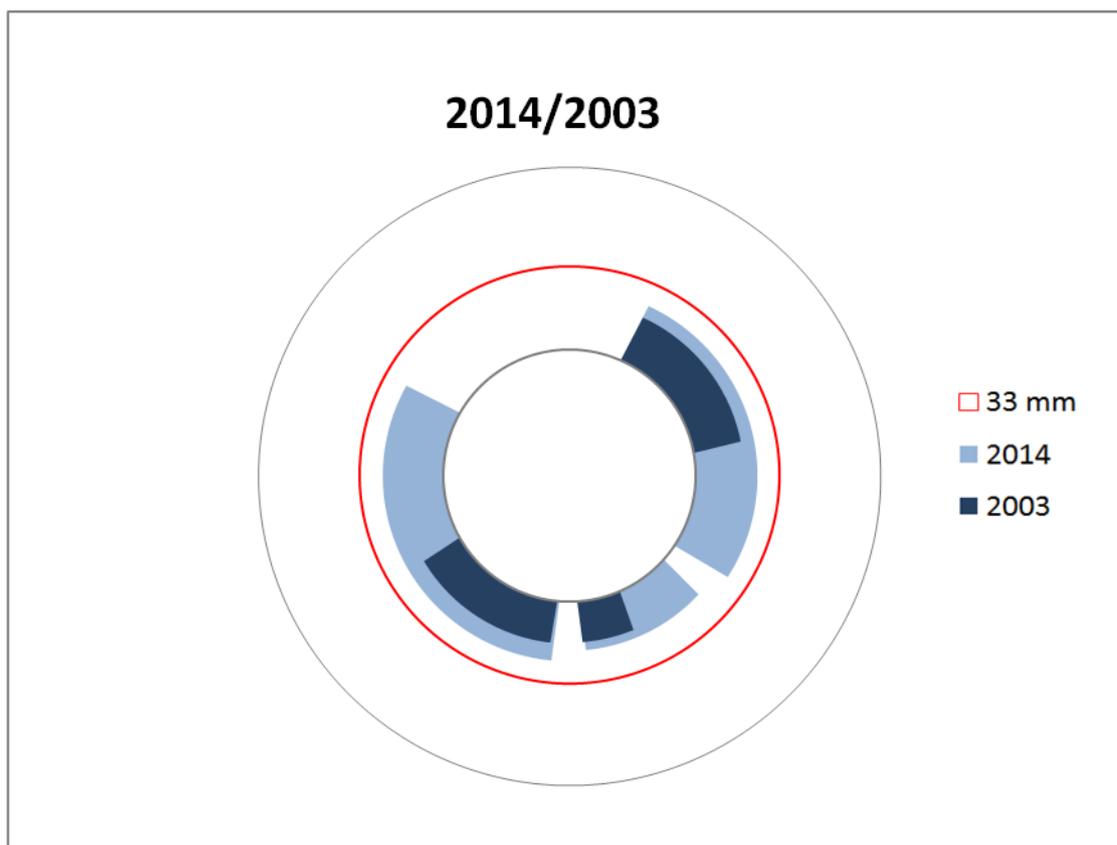


Рис. 3.7. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.4. Парогенератор №.2, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.8 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

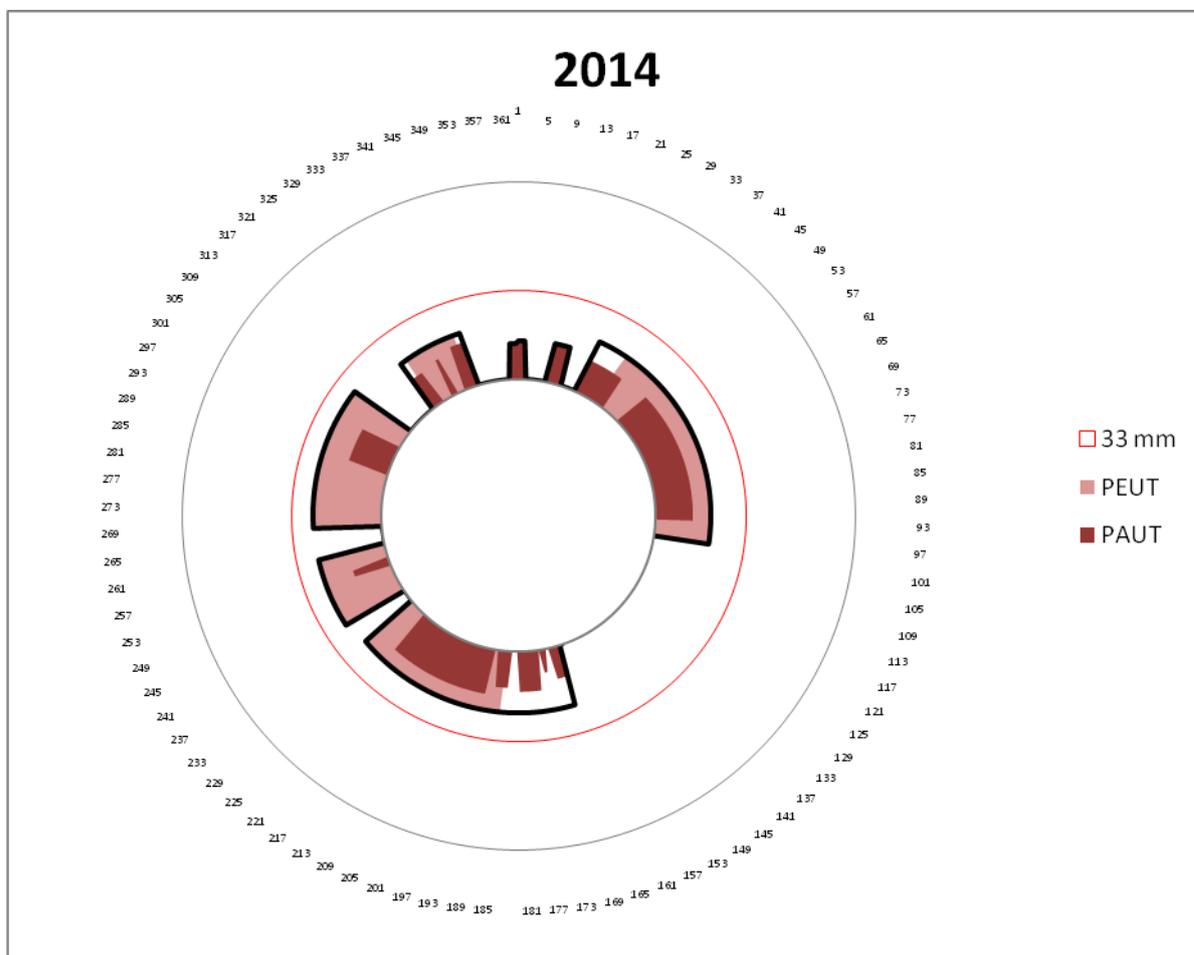


Рис. 3.8. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.10.

В табл. 3.11 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.10

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-2,00	2,20	40,3	14,11
2	12,30	17,40	49,0	14,45
3	25,60	99,93	713,5	20,26
4	163,20	231,17	652,5	22,73
5	238,39	258,06	188,8	24,99
6	267,69	308,63	393,0	25,23
7	322,60	343,55	201,1	20,26

Таблица 3.11

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	186,22	231,17	431,5	22,73

На рис. 3.9 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

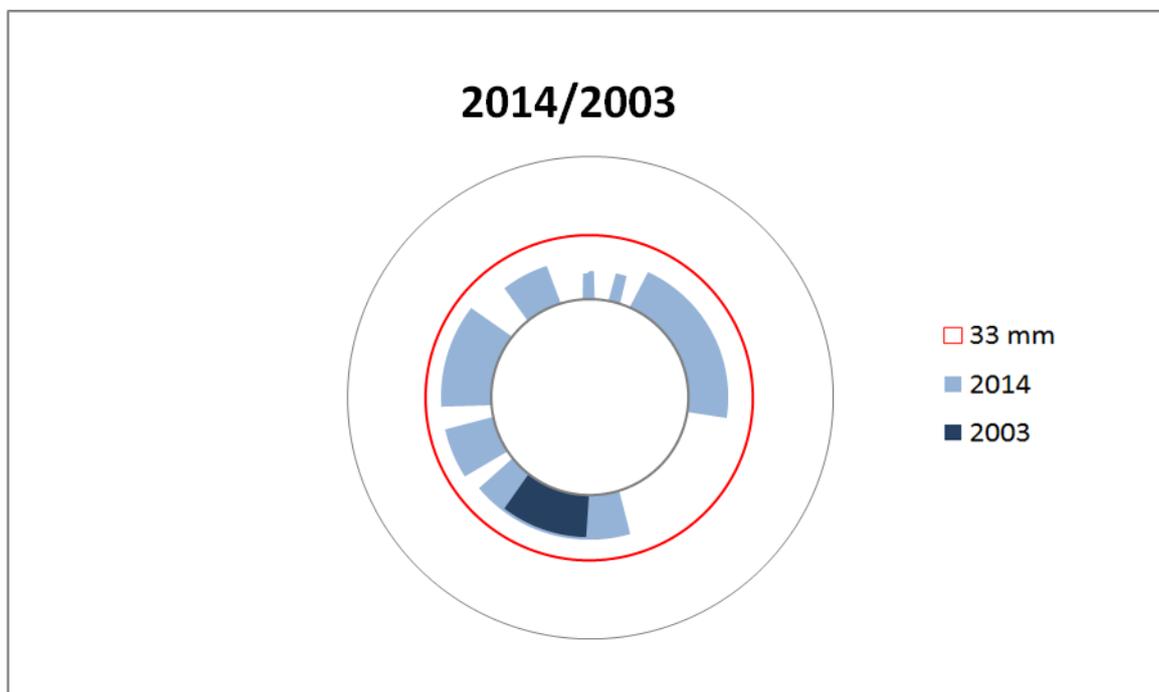


Рис. 3.9. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.5. Парогенератор №.3, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.10 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

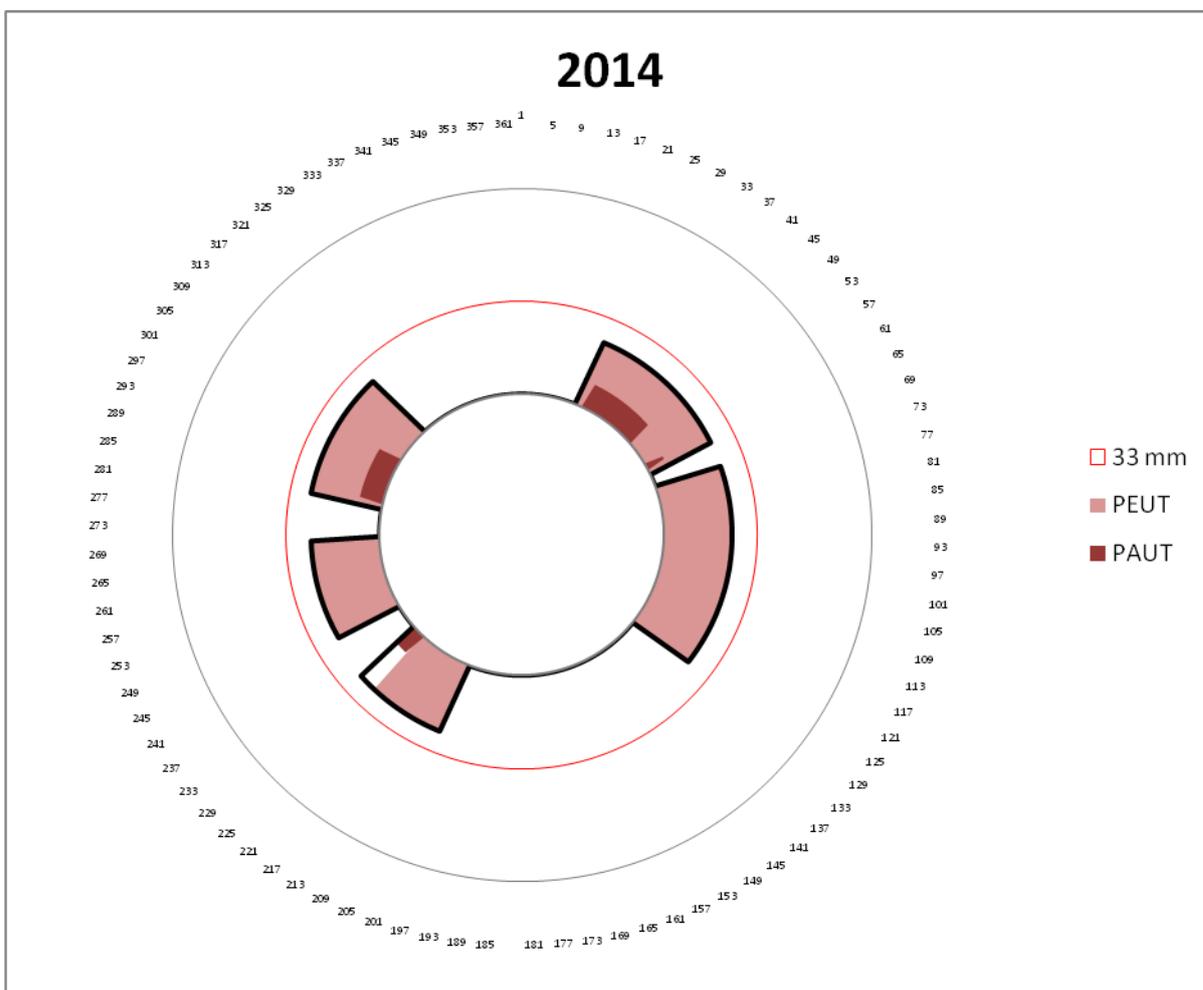


Рис. 3.10. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.12.

В табл. 3.13 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.12

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	23,82	64,43	389,8	24,11
2	71,84	128,46	543,5	24,03
3	203,04	229,30	252,1	25,61
4	241,30	269,02	266,1	24,11
5	282,30	317,05	333,6	25,56

Таблица 3.13

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	20,82	54,27	321,1	24,46
2	200,04	220,86	199,9	24,17
3	235,69	252,09	157,4	22,17
4	284,91	317,41	312,0	23,46

На рис. 3.11 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

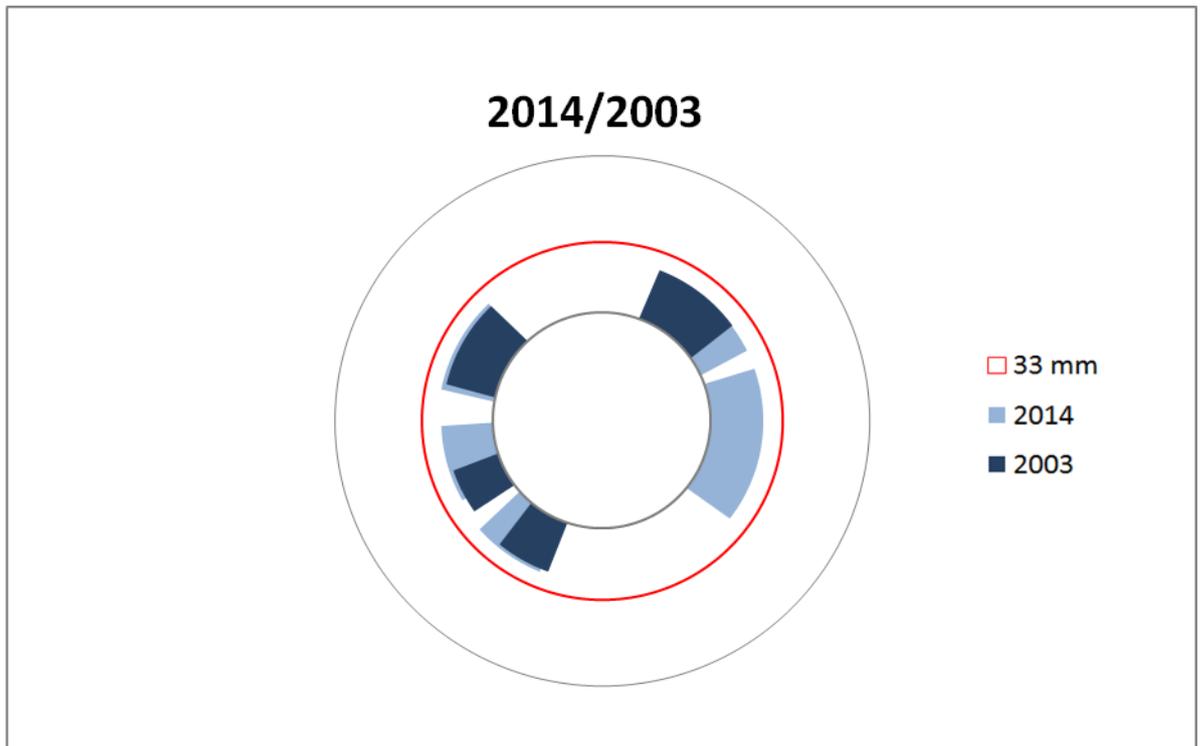


Рис. 3.11. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.6. Парогенератор №.3, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.12 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

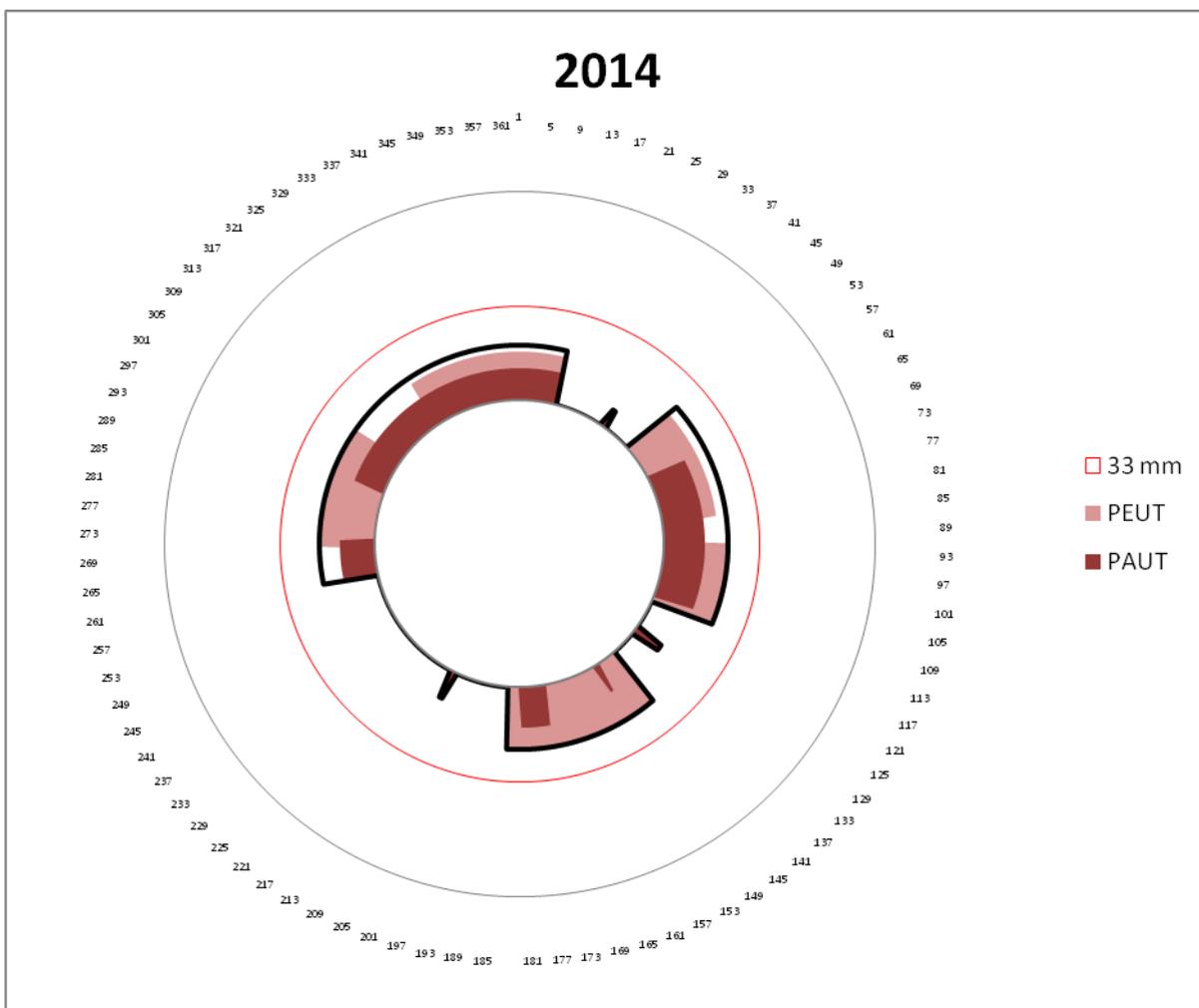


Рис. 3.12. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.14.

В табл. 3.15 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.14

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Таблица 3.15

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-101,5	14,83	1116,7	19,18
2	35,60	36,40	7,7	6,86
3	49,54	113,9	617,8	22,36
4	125,60	127,90	22,1	10,43
5	140,72	184,89	424,0	21,56
6	206,30	207,30	9,6	9,99

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-29,97	6,31	348,3	23,01
2	88,97	97,81	84,9	20,24
3	144,82	174,79	287,7	21,74
4	286,17	311,41	242,3	19,69

На рис. 3.13 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

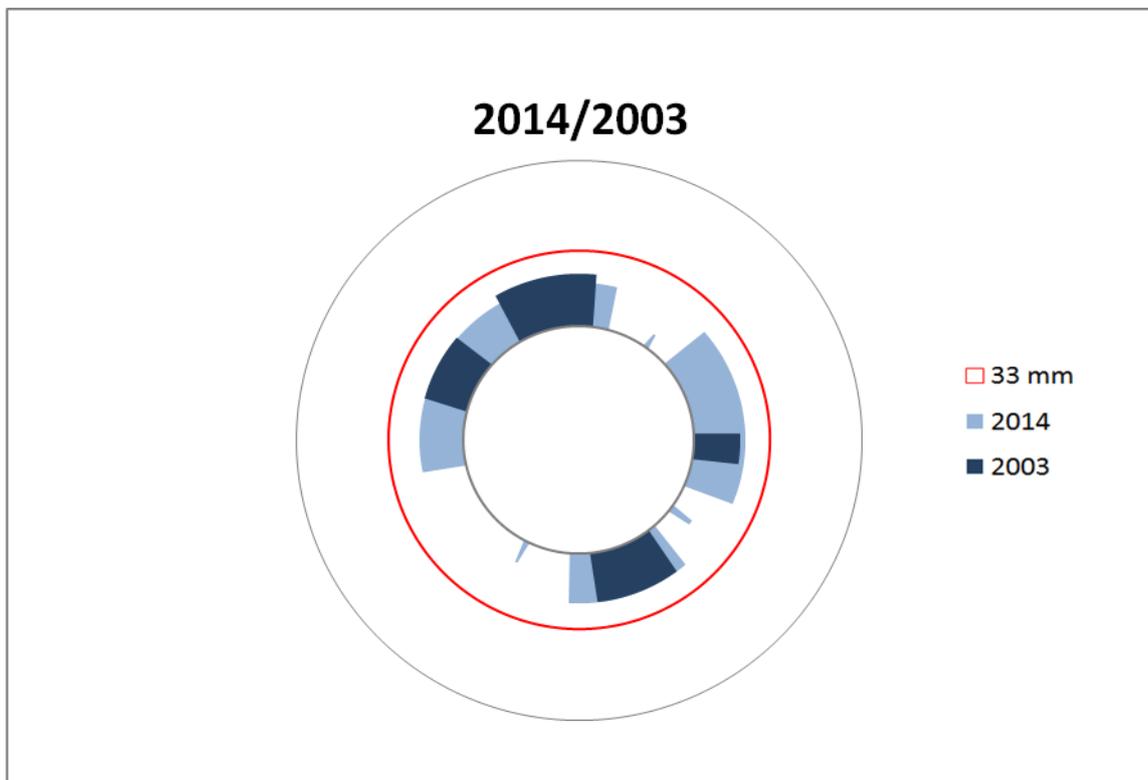
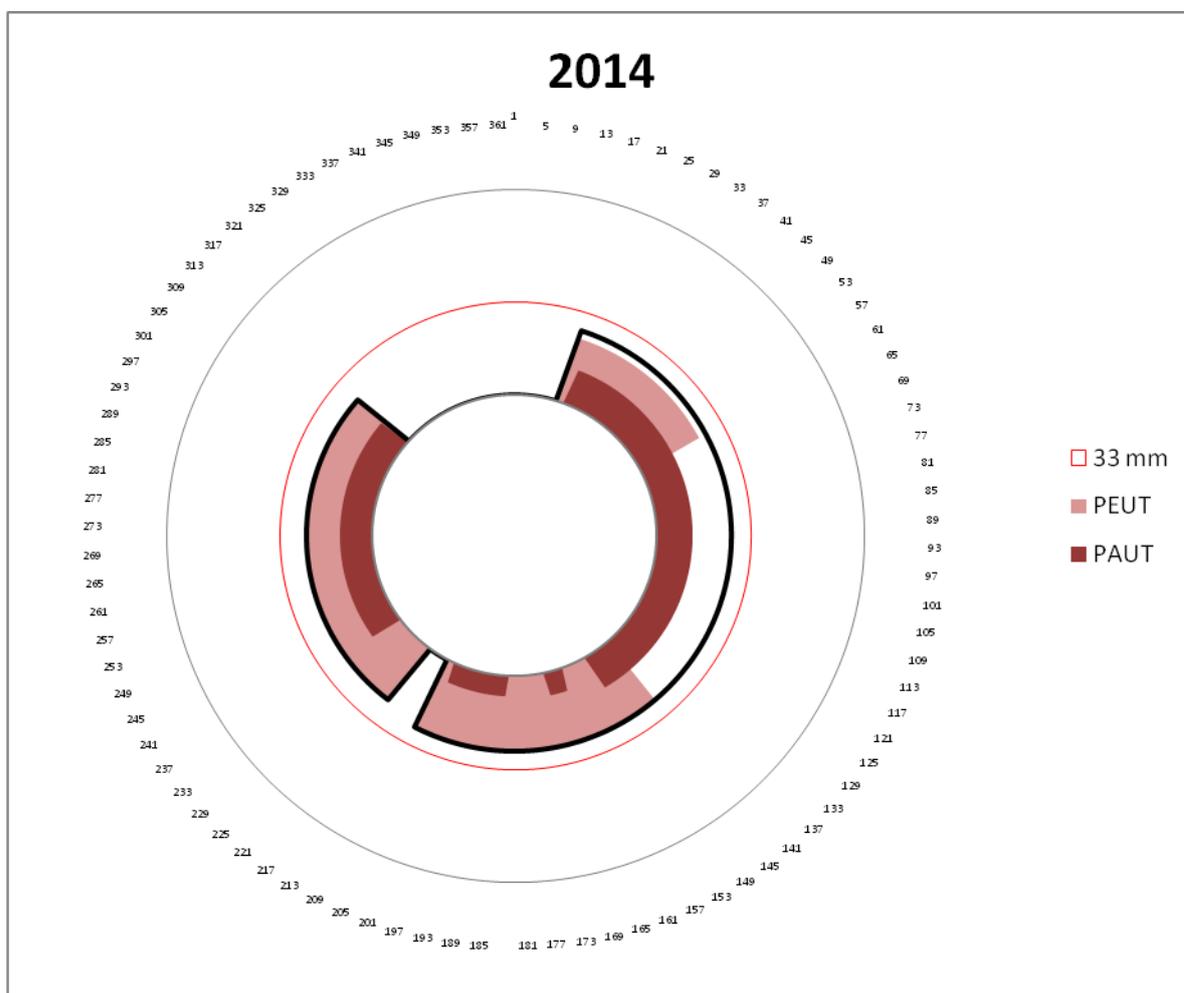


Рис. 3.13. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.7. Парогенератор №.4, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.14 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.



Результаты контроля за 2014 г.  
по методикам “Эхо-пульс” (РЕУТ) и  
“Фаз. решетка” (РАУТ), вместе взятым

Таблица 3.17

Результаты контроля за 2003 г.  
по методике “Эхо-пульс” (РЕУТ)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	Длина, мм	глуб., мм
1	18,3	208,87	1829,3	26,45
2	218,33	313,62	914,7	23,28

Расположение				
№	начало угла	конец угла	Длина, мм	глуб., мм
1	18,93	61,52	408,8	22,37
2	159,96	191,83	305,9	21,87
3	230,96	312,67	784,3	26,5

На рис. 3.15 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (РЕУТ) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (РЕУТ) и “Фаз. решетка” (РАУТ), вместе взятым.

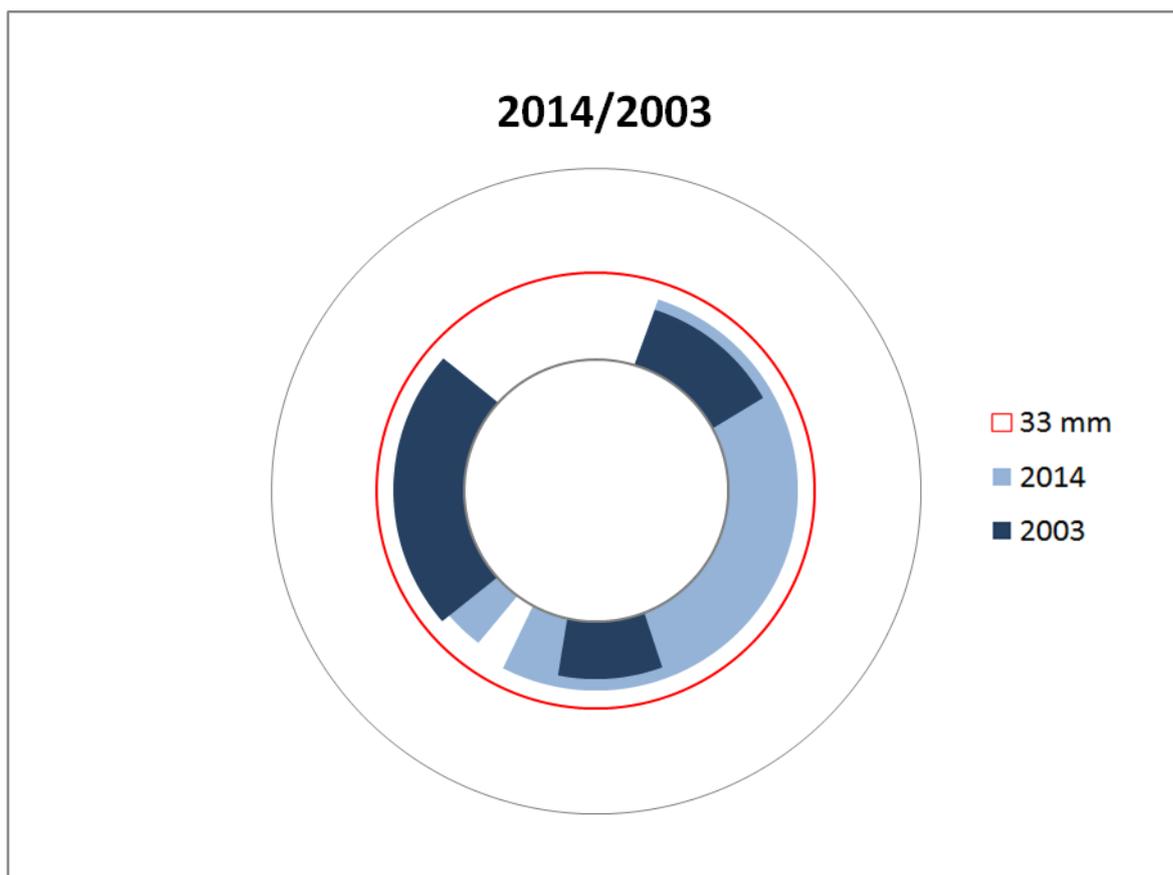


Рис. 3.15. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.8. Парогенератор №.4, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.16 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

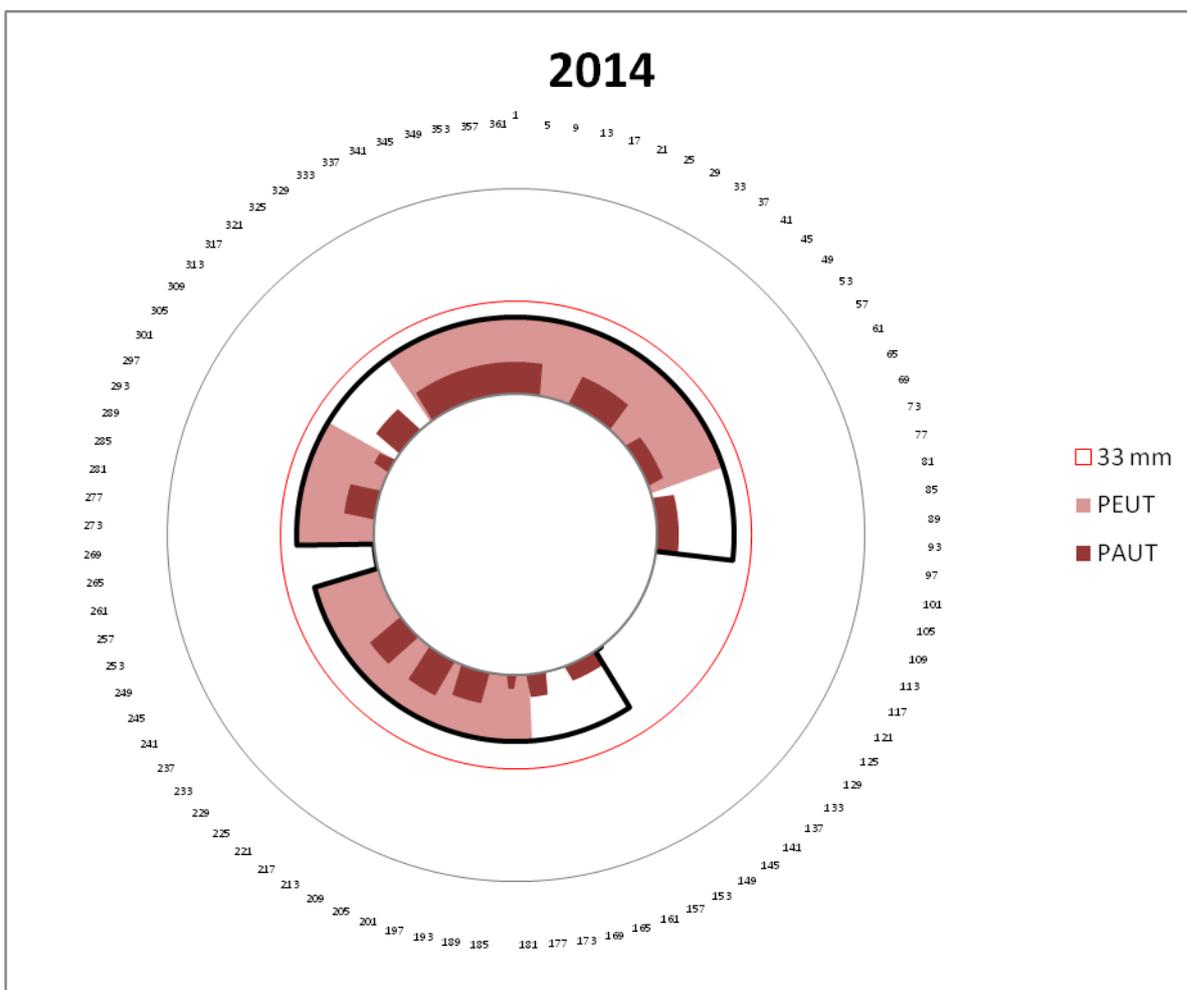


Рис. 3.16. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (РЕУТ) и “Фаз. решетка” (РАУТ), вместе взятым, представлены в табл. 3.18.

В табл. 3.19 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (РЕУТ).

Таблица 3.18

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (РЕУТ) и “Фаз. решетка” (РАУТ), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-91,50	97,00	1809,5	27,17
2	146,70	256,83	1057,2	23,23

Таблица 3.19

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (РЕУТ)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-31,24	95,92	1220,6	13,97
2	187,73	242,63	527,0	15,7
3	277,97	292,48	139,3	13,59

На рис. 3.17 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (РЕУТ) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (РЕУТ) и “Фаз. решетка” (РАУТ), вместе взятым.

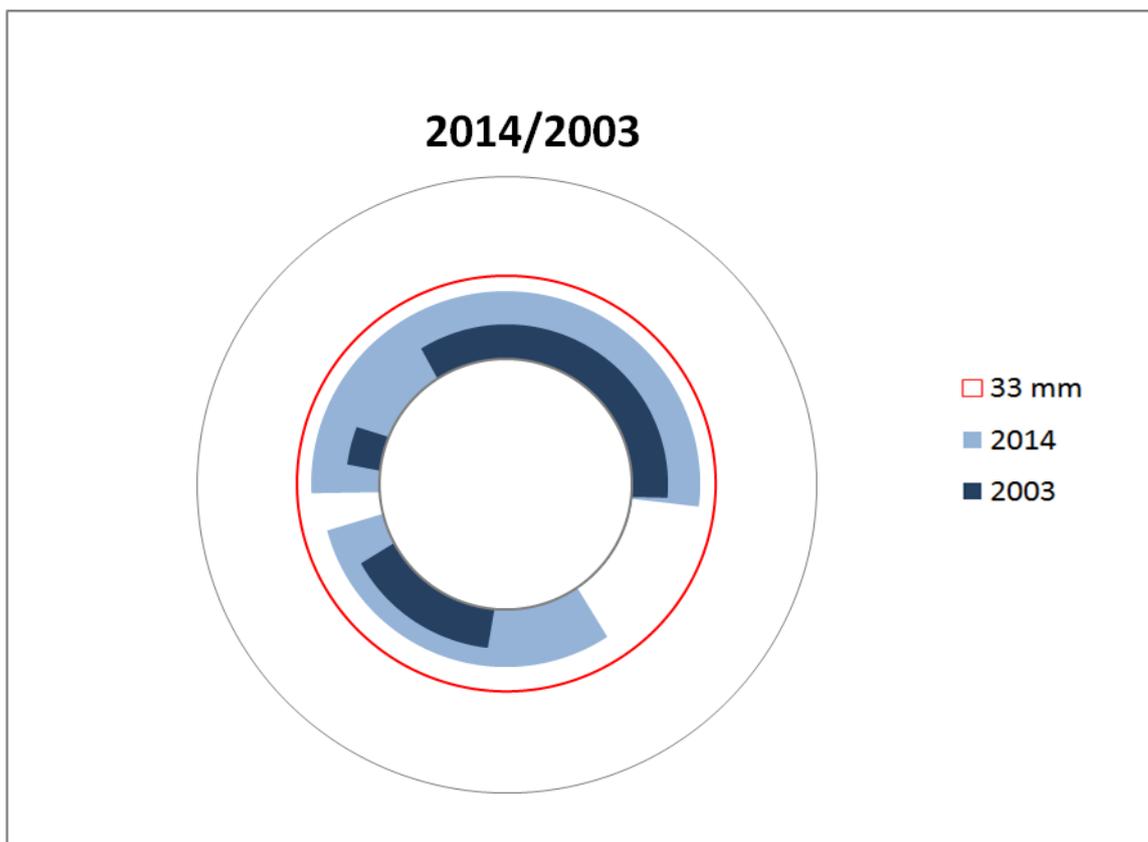


Рис. 3.17. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.9. Парогенератор №.5, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.18 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

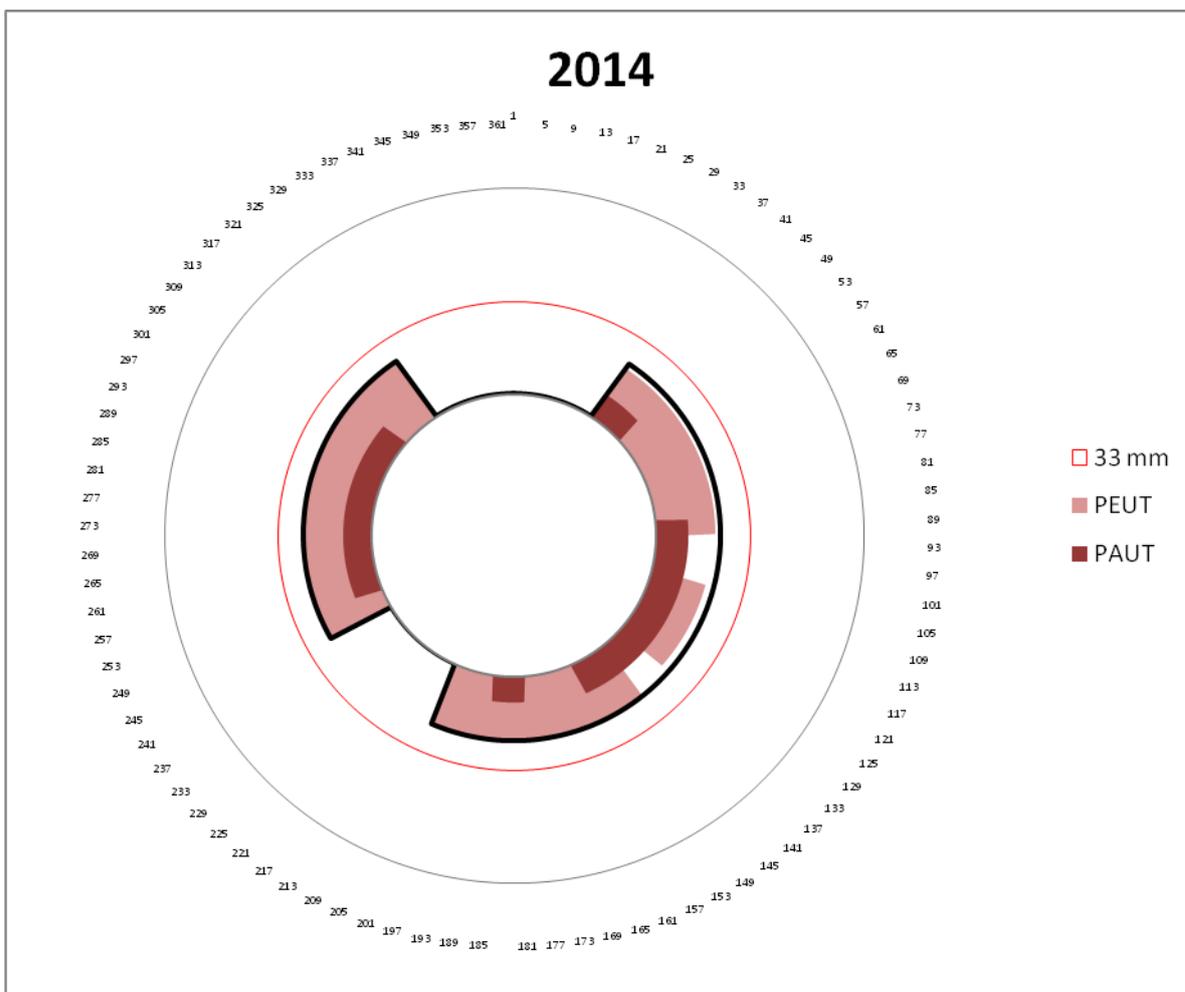


Рис. 3.18. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.20.

В табл. 3.21 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.20

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Таблица 3.21

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	34,08	204,14	1632,4	22,75
2	241,68	327,50	823,8	23,98

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	35,65	91,5	536,1	17,2
2	108,54	137,25	275,6	13,01
3	147,34	189,94	408,9	22,25
4	233,53	327,82	905,1	19,34

На рис. 3.19 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

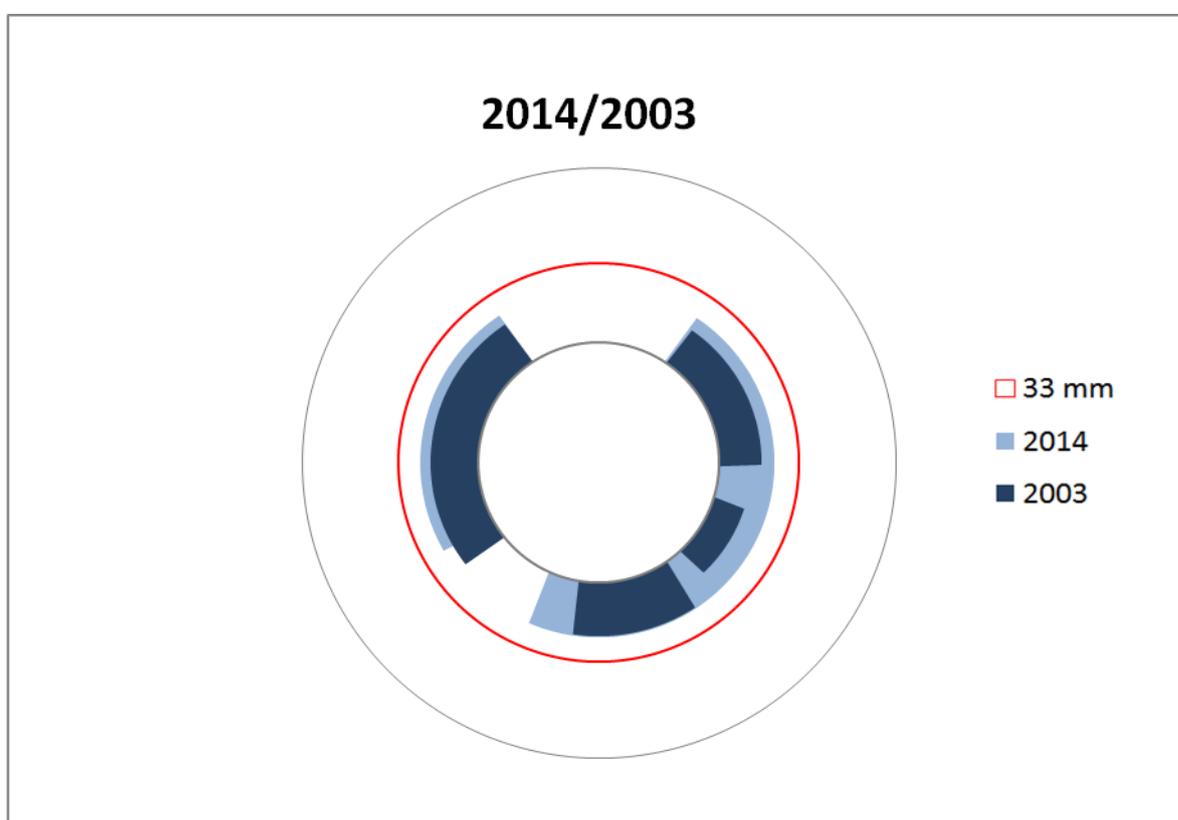


Рис. 3.19. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.10. Парогенератор №.5, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.20 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

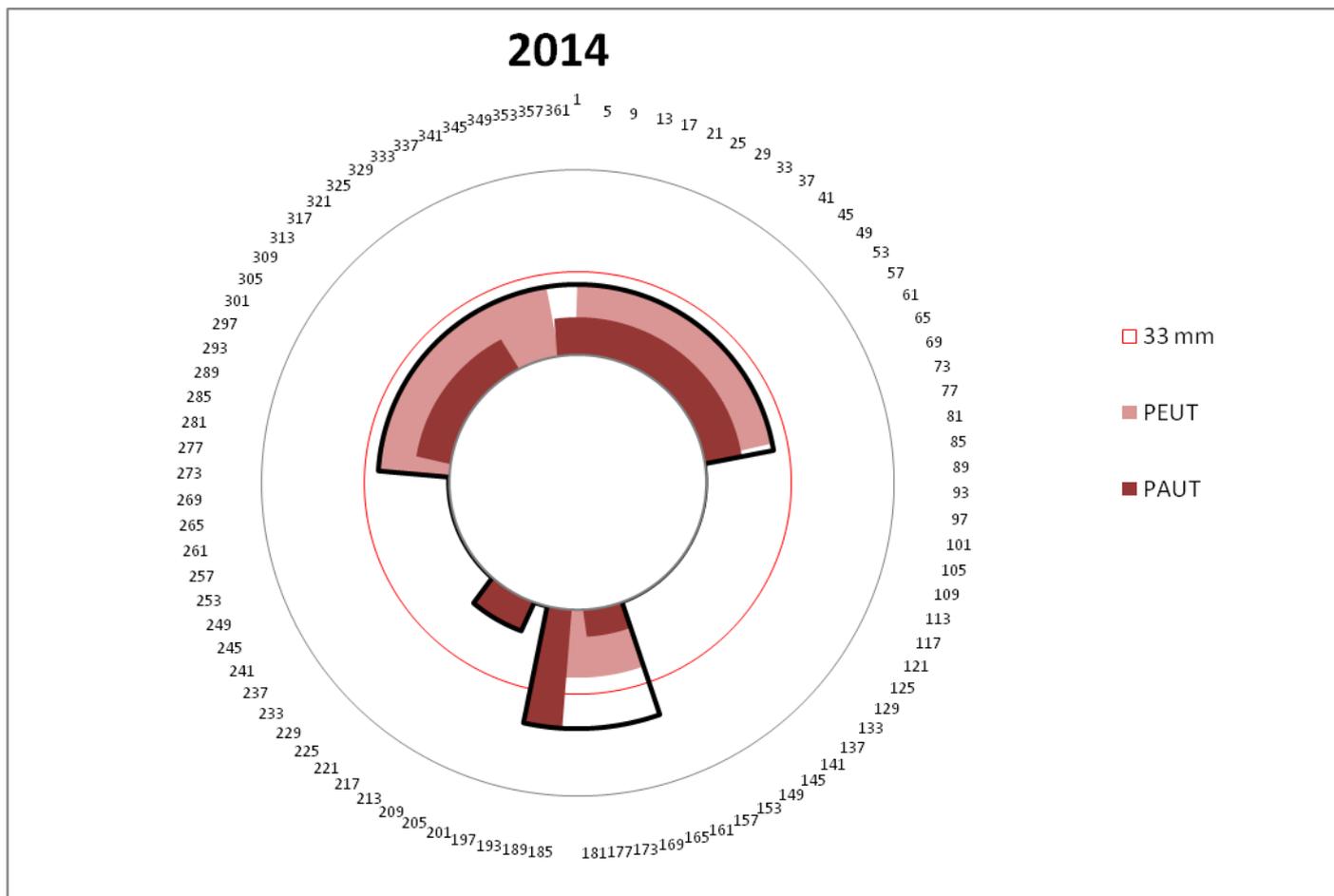


Рис. 3.20. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.22.

В табл. 3.23 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.22

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Таблица 3.23

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	-85,5	81,0	1598,3	27,46
2	160,5	193,0	312,0	46,63
3	200,3	220,7	195,8	12,22

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	41,02	82,03	393,7	24,22
2	171,01	189,94	181,7	27,13
3	293,43	341,07	457,3	23,88

На рис. 3.21 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

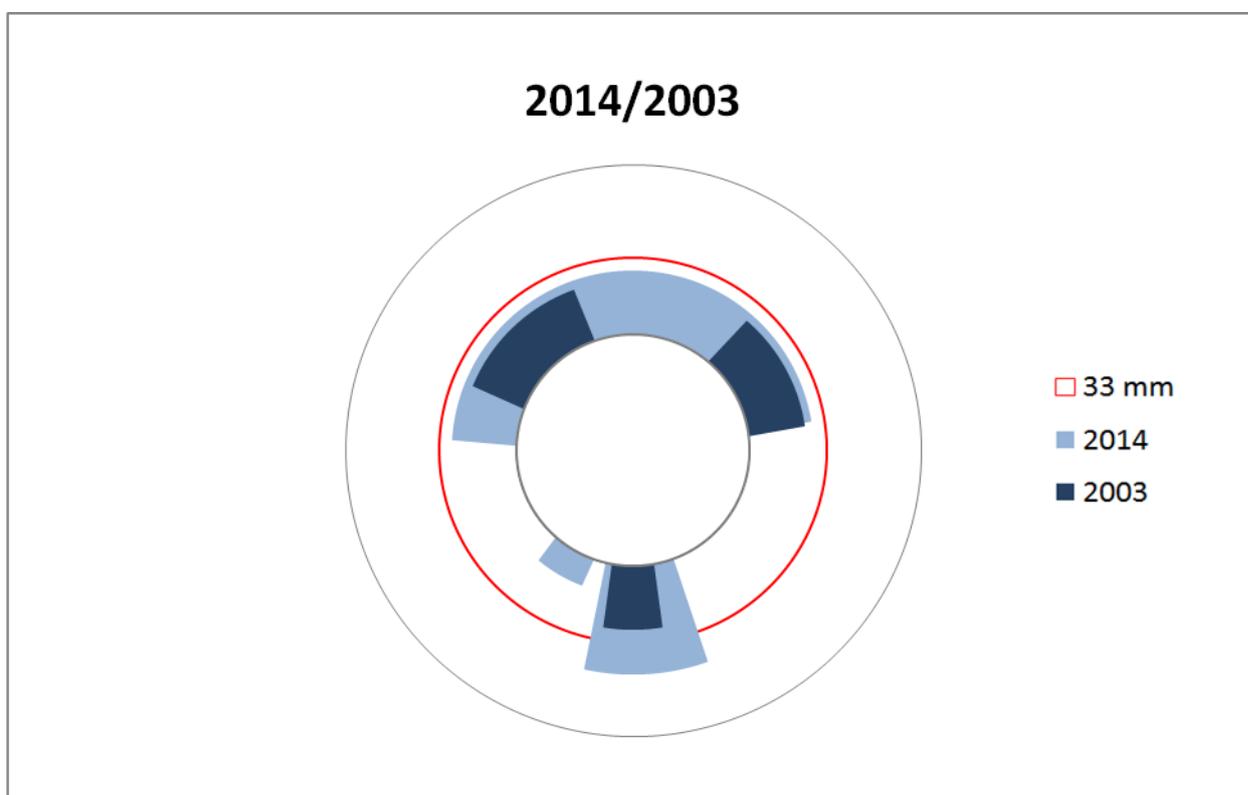


Рис. 3.21. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по

методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

На глубине выборки 25 мм на границе сплавления основного металла патрубка ПГ и предварительной наплавки кромки в координатах 3020...3080 мм была выявлена трещиноподобная несплошность размером L=60 мм. После проведенного капиллярного контроля участка выявлена протяженная плоскостная индикация (рис. 3.22 и 3.23) [88, 90].



Рис. 3.22. Изображение индикации, полученной по результатам капиллярного контроля на глубине выборки 25 мм

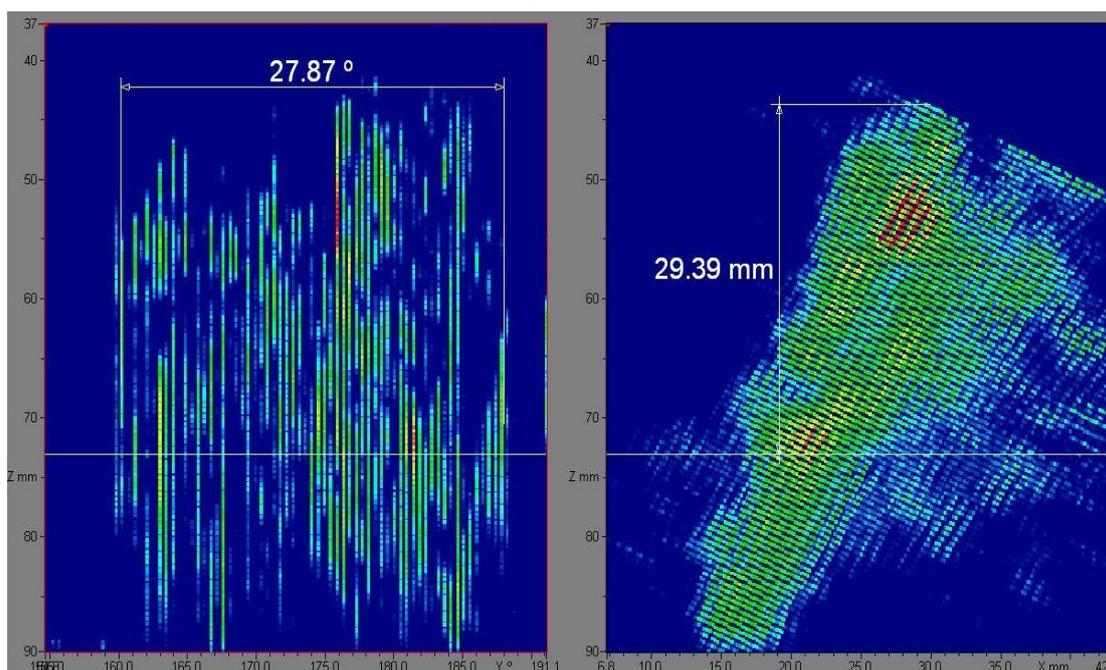


Рис. 3.23. 2ПГ-5 “горячий” коллектор, АВГУР 5.2. FT-SAFT характерное изображение коррозии в корне шва

### 3.2.11. Парогенератор №.6, “холодный” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.24 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

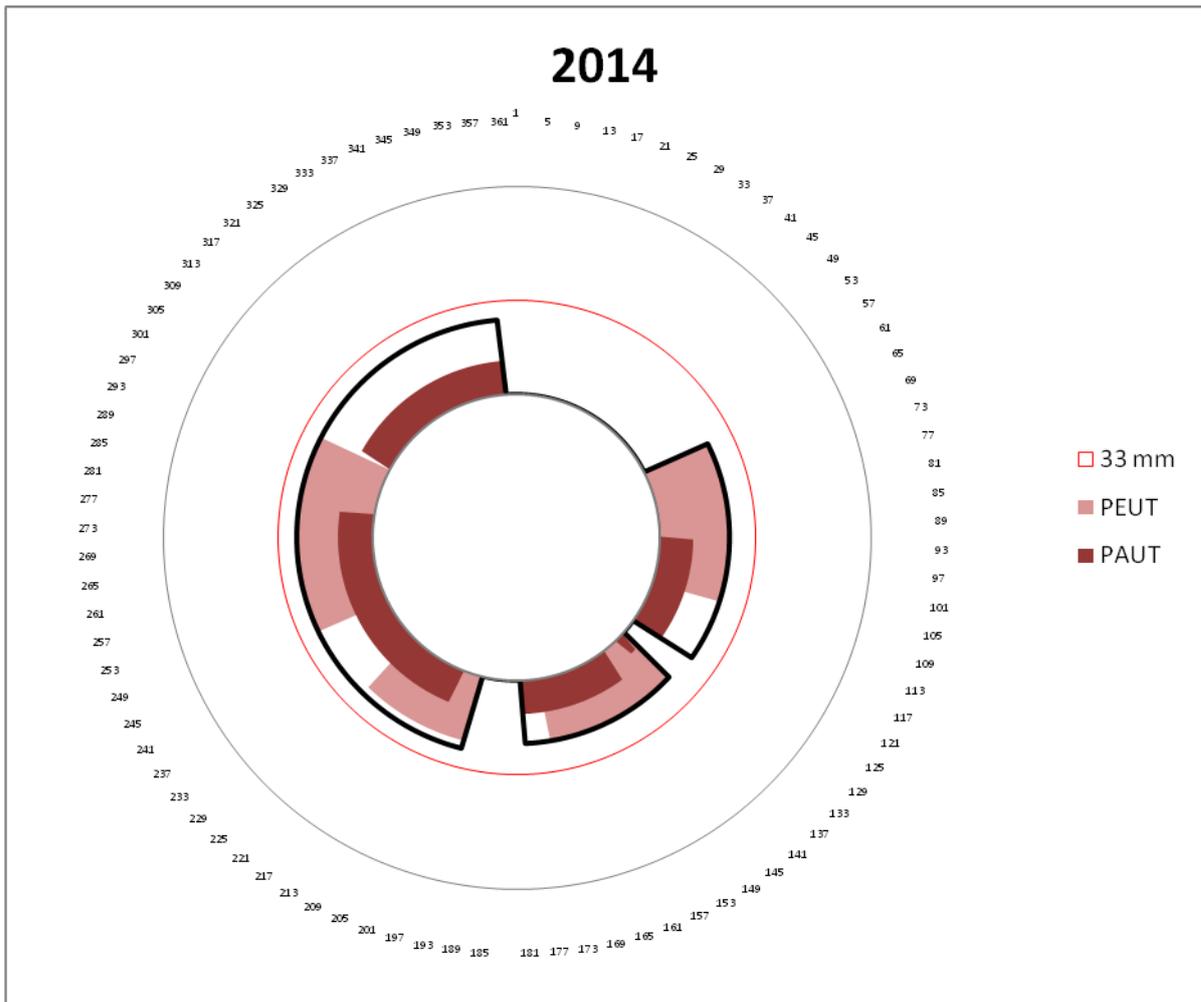


Рис. 3.24. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.24.

В табл. 3.25 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.24

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	64,36	125,30	585,0	24,15
2	133,78	178,80	432,1	22,24
3	195,30	356,90	1551,2	26,29

Таблица 3.25

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	20,82	90,55	669,3	23,03
2	221,91	234,43	120,2	24,38
3	259,67	307,94	463,3	23,1

На рис. 3.25 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

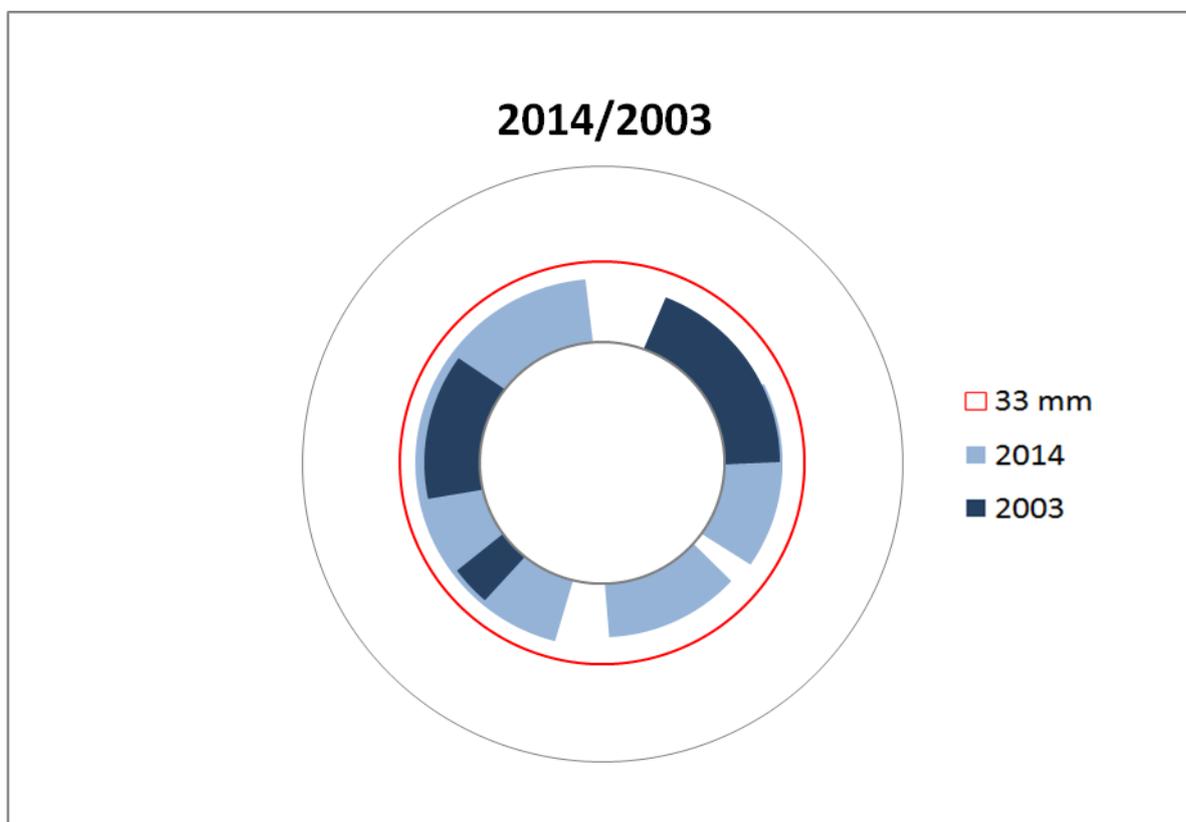


Рис. 3.25. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

### 3.2.12. Парогенератор №.6, “ горячий ” коллектор, 2003 и 2014 гг.

На рис. 3.26 показаны общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

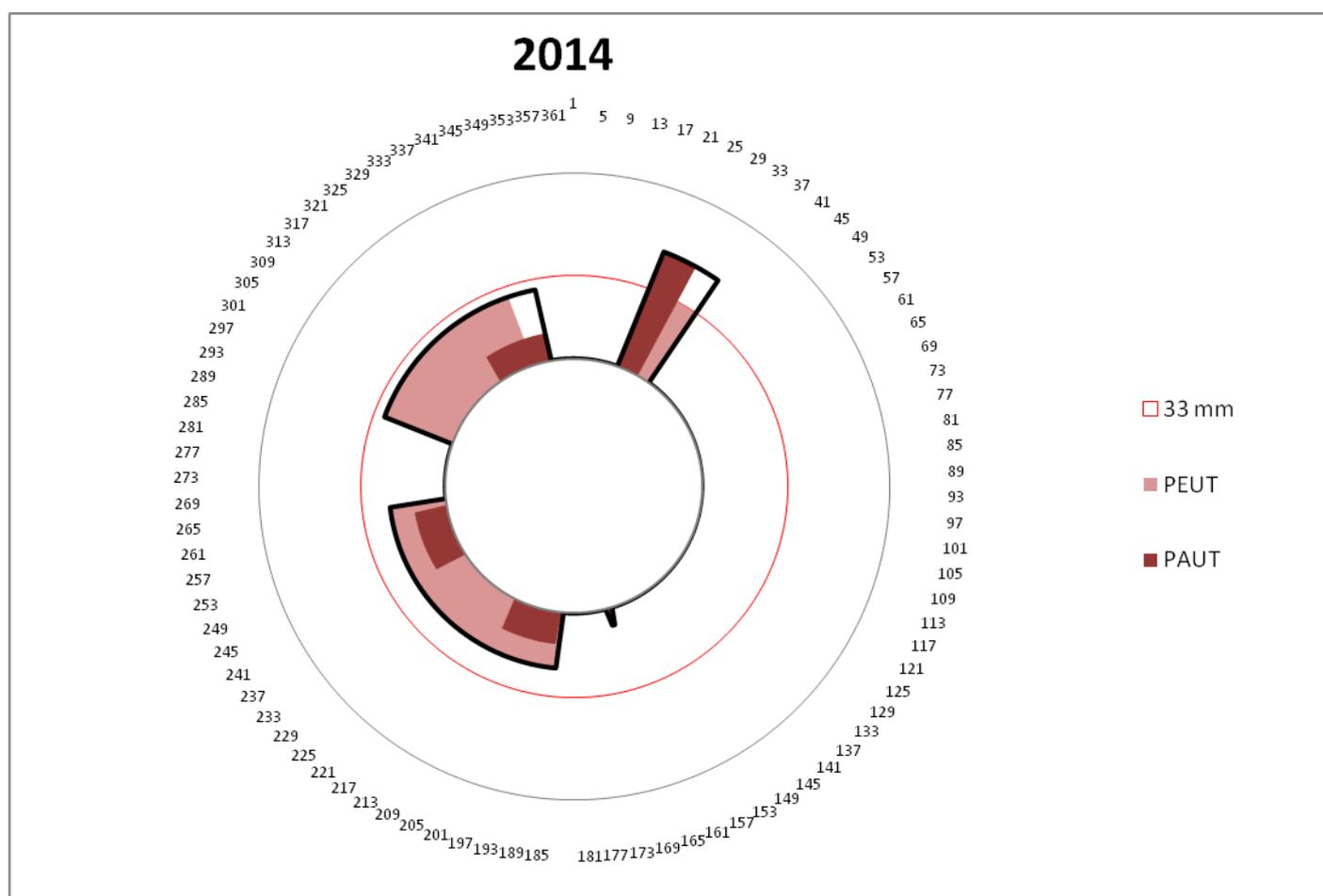


Рис. 3.26. Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

В общем счете общие и максимальные индикации, выполненные в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым, представлены в табл. 3.26.

В табл. 3.27 представлены результаты индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT).

Таблица 3.26

Результаты контроля за 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	21,50	35,04	130,0	48,42
2	164,00	165,00	9,6	6,86
3	186,47	264,08	745,0	21,91
4	291,85	349,90	557,2	28,44

Таблица 3.27

Результаты контроля за 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT)

Расположение				
№	начало угла	конец угла	длина, мм	глуб., мм
1	21,77	28,24	62,10	21,99
2	174,79	245,78	681,40	22,38
3	308,26	331,92	227,10	25,06

На рис. 3.27 представлены результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым.

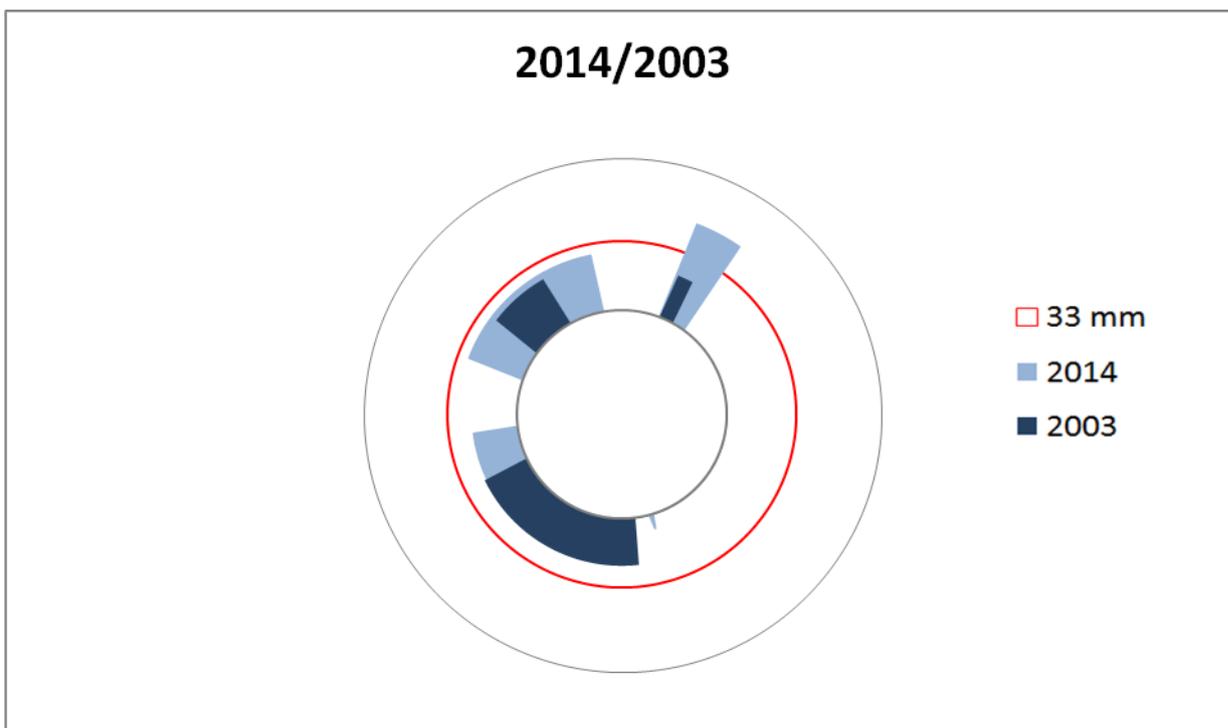


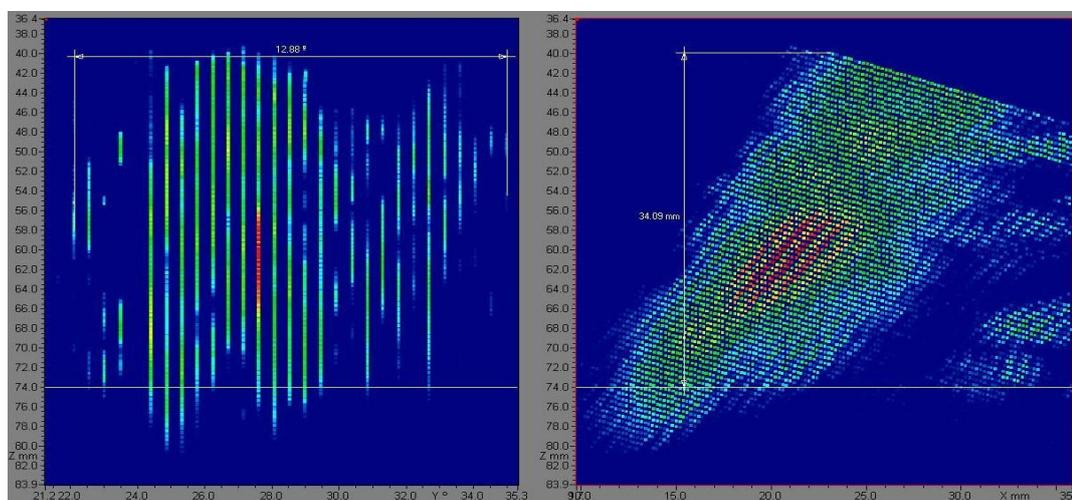
Рис. 3.27. Результаты сравнения индикаций, выполненных в 2003 г. по методике “Эхо-пульс” (PEUT) и в 2014 г. по методикам “Эхо-пульс” (PEUT) и “Фаз. решетка” (PAUT), вместе взятым

На глубине выборки 24 мм на границе сплавления основного металла патрубка ПГ и предварительной наплавки кромки в координатах 824...930 мм была выявлена трещиноподобная несплошность размером L=106 мм. После проведенного капиллярного контроля участка выявлена протяженная индикация (рис. 3.28 и 3.29) [88, 91].



Рис. 3.28. Изображение индикации, полученной по результатам капиллярного контроля на глубине выборки 24 мм

Рис. 3.29. 2ПГ-6 “горячий” коллектор, АВГУР 5.2. FT-SAFT характерное изображение коррозии в корне шва



### 3.3. Результаты экспериментальных исследований

В целом во всех проконтролированных СС Ду-1100 выявлены индикации от коррозионных повреждений корня шва (с внутренней стороны на границе сплавления основного металла патрубка и промежуточной наплавки) высотой не более 7 мм.

Недопустимые несплошности зафиксированы в “горячих” патрубках 2ПГ-5 и 2ПГ-6.

Результаты контроля на “горячем” патрубке 2ПГ-5 по методике АВГУР 5.2:

1. Выявлена трещиноподобная осевая несплошность (несплошность плоскостного типа, расположенная вдоль оси сварного соединения)

протяженностью  $L = 130$  мм и высотой  $H = 27,5$  мм. Координаты выявленной несплошности:  $Y = 2980 \div 3110$  мм;  $X = -30$  мм;  $Z = 28 \div 70$  мм.

2. По всему периметру шва выявлены индикации от коррозионных повреждений корня шва (с внутренней стороны) высотой не более 7 мм.
3. Других индикаций, требующих фиксации и/или анализа, не выявлено.

Результаты дополнительного контроля на “горячем” патрубке 2ПГ-5 по проекту методики с применением фазированной решетки:

1. Выявлена трещиноподобная осевая несплошность (несплошность плоскостного типа, расположенная вдоль оси сварного соединения) протяженностью  $L = 122$  мм и высотой  $H = 46,6$  мм. Координаты выявленной несплошности:  $Y = 2985 \div 3107$  мм;  $X = -30$  мм;  $Z = 22 \div 70$  мм.
2. По всему периметру шва выявлены индикации от коррозионных повреждений корня шва (с внутренней стороны) высотой не более 7 мм.
3. Других индикаций, требующих фиксации и/или анализа, не выявлено.

Результаты контроля на “горячем” патрубке 2ПГ-6 по методике АВГУР 5.2:

1. Выявлена трещиноподобная осевая несплошность (несплошность плоскостного типа, расположенная вдоль оси сварного соединения) протяженностью  $L = 136$  мм и высотой  $H = 32,9$  мм. Координаты выявленной несплошности:  $Y = 810 \div 946$  мм;  $X = -30$  мм;  $Z = 32 \div 70$  мм.
2. По всему периметру шва выявлены индикации от коррозионных повреждений корня шва (с внутренней стороны) высотой не более 6 мм.
3. Других индикаций, требующих фиксации и/или анализа, не выявлено.

Результаты дополнительного контроля на “горячем” патрубке 2ПГ-6 по проекту методики с применением фазированной решетки:

1. Выявлена трещиноподобная осевая несплошность (несплошность плоскостного типа, расположенная вдоль оси сварного соединения) протяженностью  $L = 84$  мм и высотой  $H = 48,4$  мм. Координаты выявленной несплошности:  $Y = 826 \div 910$  мм;  $X = -30$  мм;  $Z = 21 \div 70$  мм.

2. По всему периметру шва выявлены индикации от коррозионных повреждений корня шва (с внутренней стороны) высотой не более 6 мм.
3. Других индикаций, требующих фиксации и/или анализа, не выявлено.

### **3.4. Выводы по третьей главе**

1. При проведении АУЗК в СС Ду-1100 “горячих” коллекторов 2ПГ-5 и 2ПГ-6 энергоблока № 2 ААЭС выявлены недопустимые по действующим в РФ нормам оценки качества несплошности.
2. В “горячем” коллекторе 2ПГ-4, а также в “холодных” коллекторах 2ПГ-4 и 2ПГ-5 выявлены допустимые несплошности.
3. Во всех СС Ду 1100 обнаружены кольцевые коррозионные повреждения высотой, не превышающей 7 мм.
4. Все поврежденные ПГ (2ПГ-4, 2ПГ-5, 2ПГ-6) расположены с одной стороны относительно реактора.

## **ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К КОРПУСАМ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ВВЭР-440**

### **4.1. Анализ возможных последствий развития (до сквозной течи) дефектов в разнородных сварных соединениях узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с**

Анализ возможных последствий развития выявляемых (и ожидаемых) дефектов в разнородных сварных соединениях узлов крепления коллекторов

теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ–4с не имеет целью оценку возможности или вероятности нарушения целостности этого элемента РУ энергоблока №2 Армянской АЭС, но анализирует последствия, если такое событие произойдет по любой причине.

Анализ выполнен для конкретных повреждений, выявленных в сварных соединениях узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов “горячих” коллекторов парогенераторов 2ПГ-5 и 2ПГ-6. Выявленные повреждения имеют характер трещин на внутренней поверхности СС, по линии сплавления первого слоя аустенитной наплавки на перлитную кромку патрубки парогенератора с основным металлом корпуса парогенератора. Выявленные повреждения имеют глубину до 48,4 мм и протяженность до 312 мм.

Морфология повреждений, их расположение и причины возникновения проанализированы в предыдущих главах диссертационной работы, где показано, что нагрузки для всех режимов эксплуатации, включая переходные процессы, гидравлические испытания (ГИ), сейсмическое воздействие, могут спровоцировать развитие (на плотность и прочность) зафиксированных дефектов, вплоть до гильотинного разрыва по сварному соединению втулки переходной с патрубком парогенератора.

Такое разрушение приводит к значительной течи воды 2-го контура из поврежденного ПГ в помещение бокса ПГ. Анализ дальнейшего развития аварийного процесса показывает наиболее вероятное развитие сценария.

1. Уровень в поврежденном ПГ падает до нуля (осушение) за время около 3...4 минут (время может несколько различаться в зависимости от времени локализации ПГ по питательной воде).
2. Давление в главном паровом коллекторе (ГПК) и поврежденном ПГ до осушения (сброс давления за счет потери объема питательной воды – течь из нижней части ПГ) снижается не так быстро, как при течи из паропровода

или из трубопровода питательной воды (прямой сброс давления из паропровода и сброс давления за счет утечки пара через поврежденный трубопровод питательной воды). По этой причине происходят временная задержка отключения турбоагрегата (ТА) и, соответственно, автоматическое срабатывание аварийной защиты (АЗ-1). В этом случае АЗ-1 срабатывает автоматически после осушения ПГ по факту отключения турбоагрегата (ТА) из-за снижения давления в ГПК (до осушения ПГ давление в нем остается выше уставки срабатывания блокировок на локализацию ПГ).

3. Пар, истекающий из места повреждения ПГ, приводит к подъему давления в боксе ПГ, отключению вентиляции, срабатыванию спринклерной системы и к срабатыванию АЗ-2. АЗ-2 быстро останавливает РУ, а из-за снижения давления в ГПК отключается ТА, что также приводит к срабатыванию АЗ-1.
4. Под действием блокировок выполняется рассечение ГПК на две части. Дальнейшее снижение давления в поврежденном ПГ. Одновременно закрывается подача питательной воды на отсеченные ПГ и отключаются соответствующие главные циркуляционные насосы (ГЦН).
5. После осушения поврежденного ПГ параметры 1-го и 2-го контуров стабилизируются. Во время переходного процесса работают блокировки на поддержание параметров 1-го контура. После снижения давления в боксе ПГ активную фазу аварии можно считать законченной.
6. Срабатывание взрывных клапанов бокса ПГ и ГЦН потенциально возможно даже при проектной работе спринклерной системы, однако, учитывая место течи из ПГ (2-й контур), выброса продуктов деления в окружающую среду не происходит, и авария не имеет радиационных последствий.
7. Таким образом, возможный гильотинный разрыв переходной втулки узла крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов

парогенераторов вследствие развития анализируемого дефекта сварного соединения №23 мало чем отличается от любой другой течи из системы 2-го контура в помещении бокса ПГ и ГЦН.

Необходимо отметить, что ограничивающим фактором размера течи при гильотинном разрыве переходного кольца по дефектному композитному шву является кольцевой зазор между коллектором ПГ и обечайкой ПГ выше композитного шва (рис. 4.1). Именно в этом месте зазор, образующий проходное сечение для выхода среды (воды, пара) 2-го контура через поврежденный шов, минимальный. Поэтому определяющим фактором размера течи при гильотинном разрыве будет не собственно величина разрыва по СС, а указанный проектный зазор. Таким образом, при гильотинном разрыве по СС истечение воды будет ограничиваться только указанным зазором, т.е. максимальный эквивалентный диаметр течи соответствует проходному сечению зазора.

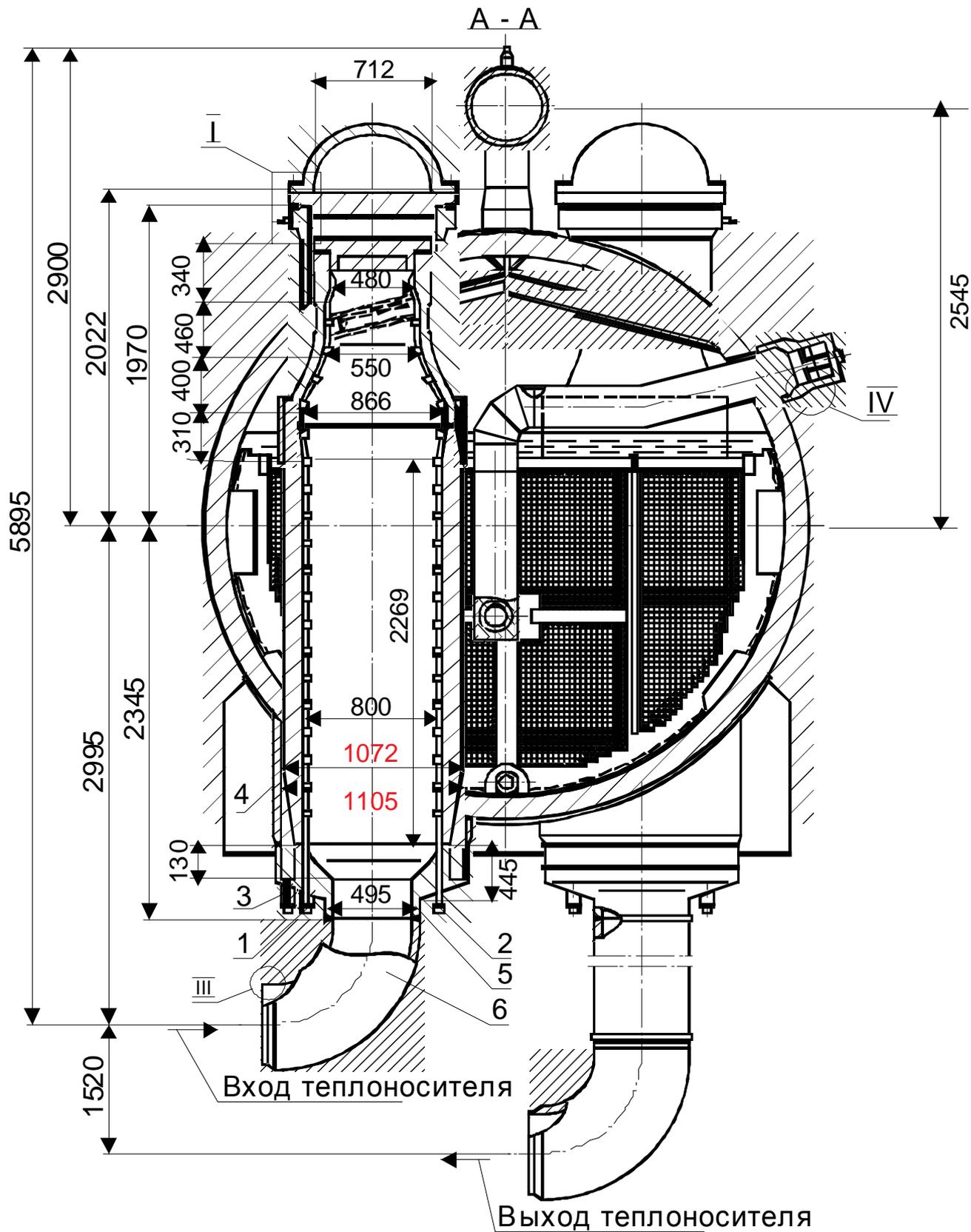


Рис. 4.1. Конструкция парогенератора АЭС с ВВЭР-440

#### **4.2. Анализ действующей аварийной документации Армянской АЭС в части управления предполагаемой аварией**

Для определения возможности диагностики аварии и действий персонала по ее ликвидации выполнен анализ действующей аварийной документации (в том числе как событийных, так и симптомно-ориентированных инструкций по ликвидации аварий на реакторной установке).

Как показано в разделе 4.1, предполагаемый гильотинный разрыв переходного кольца узла крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов по признакам и последствиям соответствует исходному событию – “Разрыв трубопровода ПГ или ГПК” (разрыв паропровода ПГ или трубопровода питательной воды). В соответствующих разделах аварийных инструкций достаточно полно описаны процедуры диагностики аварии, проектная работа и действия персонала по ликвидации аварии (в том числе и при наложении дополнительных отказов).

При гильотинном разрыве проектные технические средства безопасности автоматически локализируют поврежденный ПГ без вмешательства персонала с последующим восстановлением всех параметров 1-го и 2-го контуров и переводом энергоблока в стабильное безопасное состояние.

Для ситуации с частичным повреждением сварного соединения №23 картина несколько иная. При таком событии проектные технические средства безопасности не локализируют поврежденный ПГ. Это происходит по причине поступления в поврежденный ПГ питательной воды от питательного электронасоса (ПЭН) или аварийного питательного электронасоса (АПЭН) с расходом не менее расхода в течь, т.е. с полной ее компенсацией. Такое состояние приводит к стабилизации уровня в поврежденном ПГ. При этом давление в поврежденном ПГ также стабилизируется на уровне выше уставки срабатывания блокировок на локализацию ПГ по пару и питательной воде.

Таким образом, ПГ не локализуется, параметры стабилизируются, однако питательная вода от ПЭН (или АПЭН) с высоким расходом поступает из деаэратора МЗ через разрыв в бокс ПГ и ГЦН, что в итоге ведет к потере запаса питательной воды, разбавлению раствора бора в баке запаса (Б-8) и повышению вероятности нарушения теплоотода от ПГ. Такая ситуация требует вмешательства персонала и скорейшей ручной локализации поврежденного ПГ по пару и питательной воде. Принимая во внимание, что установленные на ААЭС системы контроля течей имеют чувствительность 3,8 л/мин, инициация вмешательства персонала обеспечивается сигналами от вспомогательных диагностических средств – датчиков влажности и датчиков шумовой диагностики системы обнаружения течей в боксе ПГ и ГЦН.

#### **4.3. Анализ влияния деградирующих факторов на остаточный ресурс узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ-4с**

Парогенераторы ПГВ-4с в составе реакторной установки В-270, по оценке ААЭС, отнесены к группе “незаменяемых” элементов частично восстанавливаемых и в значительной степени определяющих общее техническое состояние энергоблока.

Согласно положениям действующего “Технологического регламента эксплуатации энергоблока №2 ААЭС”, отключение любой петли ГЦТ с ее расхолаживанием требует останова энергоблока и исключает возобновление работы до устранения причин, повлекших отключение циркуляционной петли.

С учетом этих факторов обоснованный прогноз гарантированной целостности корпуса парогенератора становится обязательным условием продолжения эксплуатации этого оборудования и энергоблока в целом.

Как показано в предыдущих главах настоящей работы, наиболее важными

условиями для целостности корпуса парогенератора являются мониторинг технического состояния разнородных сварных соединений узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпуса парогенераторов и обоснованная оценка остаточного ресурса этих узлов.

Особую значимость прогнозная оценка остаточного ресурса этих узлов приобретает при обосновании возможности продолжения эксплуатации энергоблока АЭС за пределами проектного срока (дополнительный срок эксплуатации).

Оценка остаточного ресурса элементов АЭС выполняется по результатам обследования текущего технического состояния, анализа истории эксплуатации, деградирующих факторов (механизмов старения, в т.ч. и доминирующих), а также с учетом возможных последствий аварийной ситуации, возникновение которой может быть спровоцировано исчерпанием ресурса элемента (достижением предельного состояния).

Для анализа влияния деградирующих факторов на остаточный ресурс элемента необходимо определить все стрессоры, оценить их значимость, скорость деградаций, вызываемых стрессорами, установить критерии оценки остаточного ресурса.

Естественный процесс старения применительно к металлам, используемым в промышленности, усугубляется нагрузками, обусловленными рабочими параметрами эксплуатации (технологическими операциями).

В частности, для разнородных сварных соединений узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов причинами возможных деградаций конструкции являются следующие механизмы старения металла:

- температурное старение (низкотемпературная ползучесть) – периодические значимые изменения температуры локальных участков оборудования. Следствие – снижение прочностных свойств металла;

- многоцикловая усталость – знакопеременные напряжения в диапазоне упругих деформаций. Следствие – зарождение и развитие “усталостной трещины” после  $10^5$  циклов нагружений;
- малоцикловая усталость – знакопеременные напряжения в диапазоне пластических деформаций. Следствие – зарождение и развитие “усталостной трещины” после  $10^4$  циклов нагружений;
- коррозионное растрескивание под напряжением – нормальные растягивающие напряжения в агрессивной среде. Следствие – зарождение и развитие микротрещин;
- межкристаллитное коррозионное растрескивание – нормальные растягивающие напряжения (остаточные напряжения) в агрессивной среде и высокая температура. Следствие – зарождение и развитие микротрещин;
- общая коррозия – высокая температура агрессивной среды, несоответствие химической стойкости металла агрессивности рабочей среды. Следствие – потеря механических свойств участков, пораженных коррозией, локальные утонения.

Кроме этих общих факторов деградаций, существенный вклад в изменение технического состояния и остаточного ресурса элементов АЭС вносят стандартные и специфические условия эксплуатации.

В предыдущих главах рассмотрены основные причины возникновения и развития дефектов в сварных соединениях №23. Резюмируя их, можно обозначить доминирующие стрессоры, непосредственно связанные с эксплуатационными процессами.

**Температурный градиент.** Регламентированная разница температур металла парогенератора ( $T_{\text{ном}} = 255 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и питательной воды ( $T_{\text{ном}} = 223 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) провоцирует напряжения в сварном соединении вследствие разности коэффициентов температурных перемещений (линейного расширения) сталей перлитного и аустенитного класса, содержащихся в сварном соединении.

Напряжения от температурного градиента на стыке сталей разного класса в сварном соединении приводят к малоцикловой усталости и, соответственно, к зарождению и последующему развитию усталостных трещин.

Таким образом, диапазон температурных изменений металла корпуса парогенератора и питательной воды, скорость этих изменений при переходных режимах эксплуатации (разогрев-расхолаживание), равно, как и колебания температуры питательной воды в режимах нормальной эксплуатации (изменение теплообменных характеристик оборудования питательно-конденсатного цикла), оказывают существенное негативное воздействие на состояние металла сварного соединения и, соответственно, на остаточный ресурс этого элемента.

**Рабочая среда.** Внутренняя поверхность сварного соединения (корень шва) находится в постоянном контакте с питательной водой, являющейся в конечном итоге агрессивной средой.

Содержащиеся в питательной воде, даже в регламентированных концентрациях, хлорид-ионы, натрий, медь, вымываемые из конденсаторов, способствуют межкристаллитному растрескиванию металла корня шва, проникновению питательной воды по образовавшимся трещинным каналам к наименее химически стойкому металлу на границе первого слоя наплавки и нарастающему коррозионному повреждению этого металла.

Соединение стали ферритного класса (патрубок корпуса парогенератора) и стали аустенитного класса (1-й слой наплавки) образует гальванический элемент, который в электропроводной среде питательной воды обуславливает "гальваническую коррозию" металлов сварного соединения. Более высокий коэффициент коррозии феррита приводит к "потере" 22К материала в корневой области и раскрытию корродированного канала на границе сплавления стали 22К с металлом (сталь 10X16H25AM6) 1-го слоя наплавки. Любые ухудшения

качества питательной воды и, тем более, нарушения регламентированных показателей приводят к ускорению деградационных процессов.

**Внутреннее нагружение.** Многочисленные исследования, анализы и поиски основных причин появления и развития дефектов в металле сварного соединения №23 парогенераторов ПГВ-440 в конечном итоге сходятся на том, что деградация этого элемента инициируется механическими напряжениями, концентрируемыми в галтельном переходе патрубка корпуса парогенератора.

Первоисточником этих напряжений, в числе прочих, является и внутреннее давление в корпусе парогенератора, причем большее воздействие оказывают амплитуда и скорость изменения внутреннего давления.

Влияние внутреннего нагружения корпуса парогенератора на остаточный ресурс сварных соединений №23 наглядно оценено в настоящей работе.

#### **4.4. Разработка и обоснование критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных швов №23 патрубков Ду-1100 ПГВ-4с**

##### **4.4.1. Определение оценки критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей**

**Исходные данные.** Основные рабочие параметры, необходимые для расчета прочности парогенераторов ПГВ-4с, приведены в табл. 4.1.

Зона соединения коллекторов первого контура с корпусом парогенератора, в котором располагаются сварные соединения № 23, в процессе эксплуатации находится под воздействием давления со стороны первого и второго контуров, температурных нагрузок и нагрузок со стороны присоединяемых трубопроводов.

Номинальные физико-механические свойства материалов, принятые на основании [92], приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.1

## Основные рабочие параметры

Наименование параметра	Значение	
	Первый контур	Второй контур
Давление генерируемого пара, МПа	-	4,61
Давление со стороны теплоносителя первого контура, МПа	12,30	-
Расчетное давление, МПа	13,73	5,30
Давление гидравлических испытаний на прочность, МПа	17,16	7,3
Температура генерируемого пара, °С	-	260
Температура теплоносителя первого контура, °С		
- на входе;	300	-
- на выходе	270	-
Температура питательной воды, °С	-	158-225
Расчетная температура, °С	325	270
Минимальная допустимая температура стенки корпуса при проведении гидравлических испытаний, °С	5	70

Таблица 4.2

## Физико-механические свойства материалов

Наименование элемента	Марка материала, сортамент	T, °С	R <sub>p02</sub> , МПа	R <sub>m</sub> , МПа	E·10 <sup>-5</sup> , МПа	α·10 <sup>6</sup> , 1/°С	Z, %
Корпус парогенератора	Сталь 22К (лист)	20	215	430	2,00	11,5	40
		270	186	353	1,80	13,1	38
Патрубок Ду-1100	Сталь 22К (поковка)	20	215	430	2,00	11,5	38
		270	186	353	1,80	13,1	34
Коллектор первого контура, переходное кольцо	Сталь 08Х18Н10Т (поковка)	20	196	491	2,05	16,4	40
		325	137	314	1,75	17,6	40

Были рассмотрены также теплофизические свойства материалов, принятые на основании [93].

**Геометрия.** Хотя геометрия в этой области является более сложной, в упрощенном анализе предполагается геометрия трубы со следующими размерами:

$$D_{out}=1\ 225\ \text{мм},$$

$$D_{in}= 1\ 078\ \text{мм}.$$

Средний радиус трубы  $R$  и толщина трубной стенки  $t$ :

$$R = 575,8\ \text{мм},$$

$$t = 73,5\ \text{мм}.$$

Внутренний коллектор первого контура представляет собой трубу с внутренним диаметром  $D_{in.col}= 800$  мм, толщина стенки  $t_{col}= 90$  мм. Зазор, формирующий кольцевое пространство между самим коллектором и сварным швом коллектора, имеет радиальный размер  $h= 49$  мм (рис. 4.2).

Поскольку дефекты в этом месте возникают, как правило, из-за межкристаллитного коррозионного растрескивания или транскристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением и их проявление, как правило, обширно, длина трещины рассматривается как трещина с полной окружностью с половиной угла  $\theta=\pi$ .

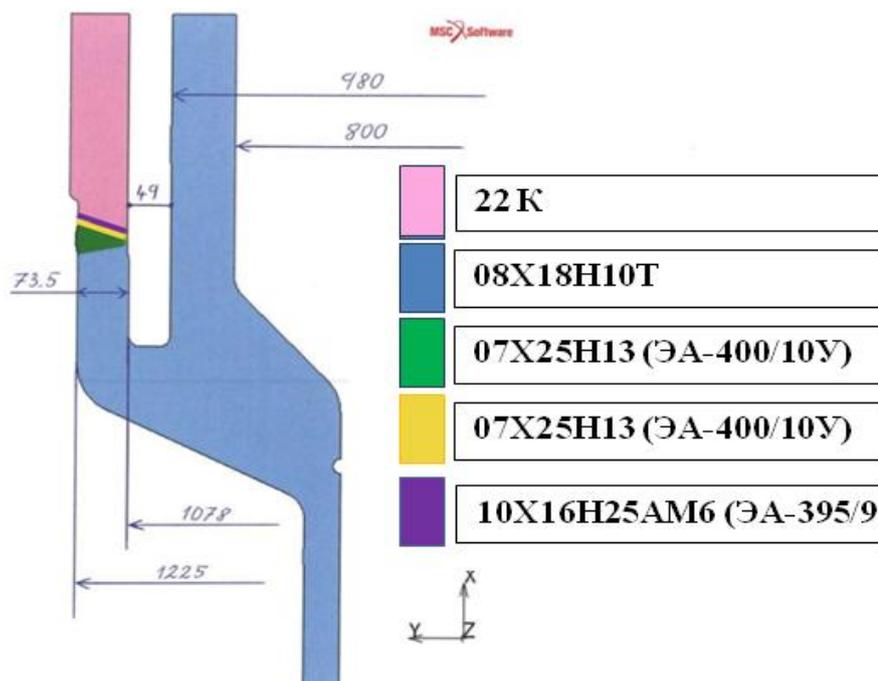


Рис. 4.2. Размеры и материалы коллектора первого контура ВВЭР-440

**Материал.** Особенностью разнородных сварных соединений узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов является их сложная геометрия и, главное, их многокомпонентность (в узле присутствуют шесть различных металлов и пять границ их соприкосновения)(рис 4.3).

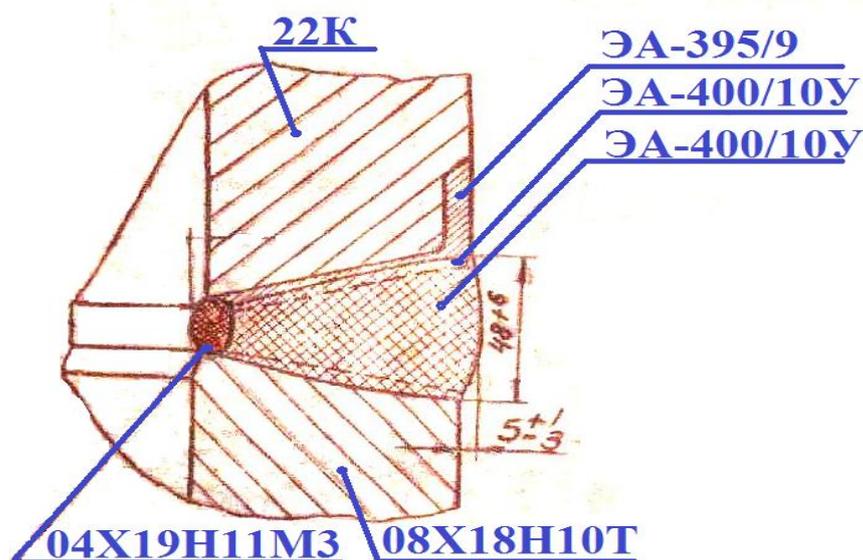


Рис. 4.3. Эскиз шва №23 приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-4

Патрубок корпуса парогенератора – углеродистая сталь 22К

Первый слой наплавки – аустенитная сталь 10X16H25AM6 (ЭА-395/9)

Второй слой наплавки – аустенитная сталь 07X25H13 (ЭА-400/10У)

Заполнение шва – аустенитная сталь 07X25H13 (ЭА-400/10У)

Корень шва – аустенитная сталь 04X19H11M3

Втулка переходная (коллектор ПГ) – аустенитная сталь 08X18H10Т

**Нагрузка.** Нагрузки были выбраны для трех режимов эксплуатации: НУЭ (нормальные условия эксплуатации), НУЭ+МРЗ (максимальное расчетное землетрясение) и гидравлические испытания (на плотность и на прочность)[94].

Несмотря на то, что парогенераторы Армянской АЭС изначально имеют дополнительное сейсмическое усиление конструкции, для анализа было выбрано исходное состояние без дополнительного усиления, чтобы повысить консерватизм и сделать анализ более простым для этого этапа, поскольку для сейсмического усиления было постулировано некоторое количество сбоек демпферного оборудования. Расчет будет производиться для сварных швов как на “горячей”, так и на “холодной” нитке.

Нагрузки представлены в табл. 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3

Нагрузки на сварной шов “холодной” нитки в условиях НУЭ+МРЗ

Нагрузка	Осевая нагрузка, Р [Н]	Нагрузка крутящего момента, М [Нм]	Изгибное напряжение оси Z, М <sub>2</sub> [Нм]	Изгибное напряжение оси X, М <sub>3</sub> [Нм]
Собственный вес	-18660,68	-3382,16	-22140,31	2926,66
Внутреннее давление	670,4	-1791,82	-1068,32	-747,77
Сейсмичность	41700,54	116073,73	33894,84	45419,6
Тепловое расширение	Не используется	-129476,57	-57036,88	11420,81

Таблица 4.4

Нагрузки на сварной шов “горячей” нитки в условиях НУЭ+МРЗ

Нагрузка	Осевая нагрузка, Р [Н]	Нагрузка крутящего момента, М [Нм]	Изгибное напряжение оси Z, М <sub>2</sub> [Нм]	Изгибное напряжение оси X, М <sub>3</sub> [Нм]
Собственный вес	-49341,52	-15488,64	-40638,36	12862,94
Внутреннее давление	112,82	208,42	-690,32	-1138,23
Сейсмичность	124301,84	171551,14	110842,45	95326,98
Тепловое расширение	Не используется	25865,31	130430,67	1868,04

Давление первого контура составляет 12,4 МПа, давление второго контура - 4,80 МПа, внутренний диаметр коллектора первого контура - 0,80 м. Осевая нагрузка в первом контуре, вызванная давлением в первом контуре, может быть определена по формуле (7) (раздел 2.2):

$$F_{lid,prim} = \pi \cdot \left( \frac{0,80^2}{4} \right) \cdot (12,4 \cdot 10^6 - 4,80 \cdot 10^6) = 3,82 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Осевая нагрузка в первом контуре, вызванная давлением во втором контуре, решается по формуле (8) (раздел 2.2):

$$F_{lid,sec} = \pi \cdot \left( \left( \frac{1,078}{4} \right)^2 - \left( \frac{1,078 - 2 \cdot 0,049}{4} \right)^2 \right) (4,80 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6) = 7,44 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Общая аксиальная нагрузка первого контура для сварного шва “горячей” нитки с более консервативными результатами решается по формуле (9) (раздел 2.2):

$$F_{ax} = 3,82 \cdot 10^6 + 7,44 \cdot 10^5 + |-49341,52 + 112,82| + 124301,84 = 4,74 \cdot 10^6 \text{ Н,}$$

для сварного шва “холодной” нитки:

$$F_{ax} = 4,62 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Момент изгиба по первому контуру с учетом момента кручения рассчитывается по формуле (10) (раздел 2.2):

- для сварного шва “горячей” нитки с более консервативным результатом:

$$M_{b,гор} = 263670 \text{ Нм;}$$

- для сварного шва “холодной” нитки:

$$M_{b,хол} = 142223 \text{ Нм.}$$

Момент изгиба по второму контуру рассчитывается по формуле (11) (раздел 2.2):

- для сварного шва “горячей” нитки с более консервативным результатом:

$$M_{e,гор} = 132984 \text{ Н;}$$

- для сварного шва “холодной” нитки:

$$M_{e,хол} = 141943 \text{ Н.}$$

Значения, необходимые для оценки мембранных напряжений в первом контуре, могут быть определены по формуле (7) (раздел 2.2):

$$\sigma_{m,гор} = \frac{4,62 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 575,8 \cdot 73,5} = 17,4 \text{ МПа.}$$

Напряжение при изгибе по первому контуру рассчитывается по формуле (13)(раздел 2.2):

$$\sigma_{b,гор} = \frac{263670000}{21457502725} = 3,44 \text{ МПа.}$$

Напряжение при изгибе по второму контуру контуру рассчитывается по формуле (14)(раздел 2.2):

$$\sigma_{e,гор} = \frac{132984000}{21457502725} = 1,74 \text{ МПа.}$$

Значения напряжений сведены в табл. 4.5-4.8 для режимов эксплуатации: НУЭ, НУЭ+МРЗ и ГИ (на плотность и на прочность).

Таблица 4.5

Напряжения в СС коллекторов 1-го контура для НУЭ+МРЗ

Напряжение	СС в “горячей” нитке	СС в “холодной” нитке
Мембранные напряжения в первом контуре	17,4 МПа	15,2 МПа
Напряжение при изгибе в первом контуре	3,44 МПа	1,61 МПа
Напряжение при изгибе во втором контуре	1,74 МПа	1,60 МПа

Таблица 4.6

Напряжения в СС коллекторов 1-го контура в “горячей” нитке для НУЭ

Мембранные напряжения в первом контуре	15,1 МПа
Напряжение при изгибе в первом контуре	0,52 МПа
Напряжение при изгибе во втором контуре	1,50 МПа

Таблица 4.7

“Горячая” нитка. Напряжения в сварном шве при испытаниях на плотность

Мембранные напряжения в первом контуре	22,5 МПа
Напряжение при изгибе в первом контуре	0,33 МПа
Напряжение при изгибе во втором контуре	0,43 МПа

Таблица 4.8

“Горячая” нитка. Напряжения в сварном шве при испытаниях на прочность

Мембранные напряжения в первом контуре	31,4 МПа
Напряжение при изгибе в первом контуре	0,33 МПа
Напряжение при изгибе во втором контуре	0,43 МПа

Расчет допустимого напряжения при изгибе был выполнен для материала 22К сварных соединений “горячей” и “холодной” нитки, для различных относительных глубин трещин  $a/t$ , расположенных параллельно оси сварного соединения (по образующей).

Сварное соединение “горячей” нитки обладает более низким резервом, поэтому расчеты для материала 04X19H11M3 (с наименьшим пределом текучести из всех аустенитных сталей) и углеродистой стали 22К для большей консервативности были выполнены именно для “горячей” нитки. Было показано, что наиболее консервативный результат был получен для материала 22К.

Напряжения при изгибе в случае пластических деформаций  $\sigma_b$ , допустимые напряжения  $S_c$  при изгибе для различных глубин трещин  $a/t$ , условий нагрузки и материалов сведены в обобщенные результаты для различных условий нагрузки, которые для относительных глубин постулированных трещин  $a/t = 0,74$  представлены в табл. 4.9. Результаты решаются по формуле (2) (раздел 2.2).

Таблица 4.9

Допустимые значения напряжений при изгибе и их запас для различных эксплуатационных режимов для кольцевой трещины  $a/t = 0.74$

Нитка	Материал	Условие	$\sigma_b^c$ [МПа]	$S_c$ [МПа]	$\sigma_b$ [МПа]	$S_c/\sigma_b$
“Горячая” нитка	22К	НУЭ+МРЗ	141	28,7	3,4	8,4
“Холодная” нитка	22К	НУЭ+МРЗ	142	29,1	1,6	18,2
“Горячая” нитка	СС и наплавка (ЭА-395/9 + ЭА-400/10Т)	НУЭ+МРЗ	138	41,7	3,4	12,3
“Горячая” “нитка	22К	НУЭ	142	10,2	0,5	20,4
“Горячая” нитка	22К	Испытание на плотность	128	1,65	0,3	5,5
“Горячая” нитка	22К	Испытание на прочность	90,9	-9.78	0,3	<0

Напряжение при изгибе в случае пластических деформаций  $\sigma_b^c$ , допустимые напряжения при изгибе  $S_c$  для различных глубин трещин  $a/t$  представлены в таблицах П.1.1-П.1.6 Приложения 1. Полученные результаты были использованы для определения критических дефектов и допустимых размеров кольцевых и единичных коротких размеров дефектов.

Критический размер дефекта – это такой размер, при достижении которого происходит мгновенное разрушение конструкции.

Допустимый в эксплуатации размер несплошности не должен превышать такого значения, которое равно критическому размеру, уменьшенному на соответствующие коэффициенты запаса прочности.

Выполнен расчет критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей в режимах НУЭ, НУЭ+МРЗ и ГИ на прочность для всех

12 патрубков Ду-1100 в районе СС23 ААЭС. Результаты расчета по методу пластического шарнира (раздел 2.3) представлены в Приложении 2 (рис. П.2.1-П.2.6).

**Предельно допустимые размеры для кольцевых дефектов.** Из полученных результатов расчета (Приложение 2) взят самый неблагоприятный вариант при учете коэффициентов запаса (раздел 2.2) и сформированы предельно допустимые размеры для кольцевых дефектов. Размеры в табл. 4.10 даны без учета времени предстоящей эксплуатации (времени до следующего контроля или ремонта).

Таблица 4.10

Предельно допустимые размеры для кольцевых дефектов

№/№ ПГ	Коллектор	Предельно допустимая глубина кольцевого дефекта, мм
1	“хол.”	21,7
	“гор.”	21,4
2	“хол.”	21,1
	“гор.”	21,1
3	“хол.”	21,4
	“гор.”	21,4
4	“хол.”	20,3
	“гор.”	20,6
5	“хол.”	21,4
	“гор.”	21,4
6	“хол.”	20,7
	“гор.”	20,5

**Предельно допустимые размеры для коротких дефектов.** В результате сравнительного анализа данных измерения высоты трещины по АУЗК (АВГУР 5.2) (по главе 3) была получена зависимость частоты погрешности при контроле от размера погрешности (рис. 4.4).

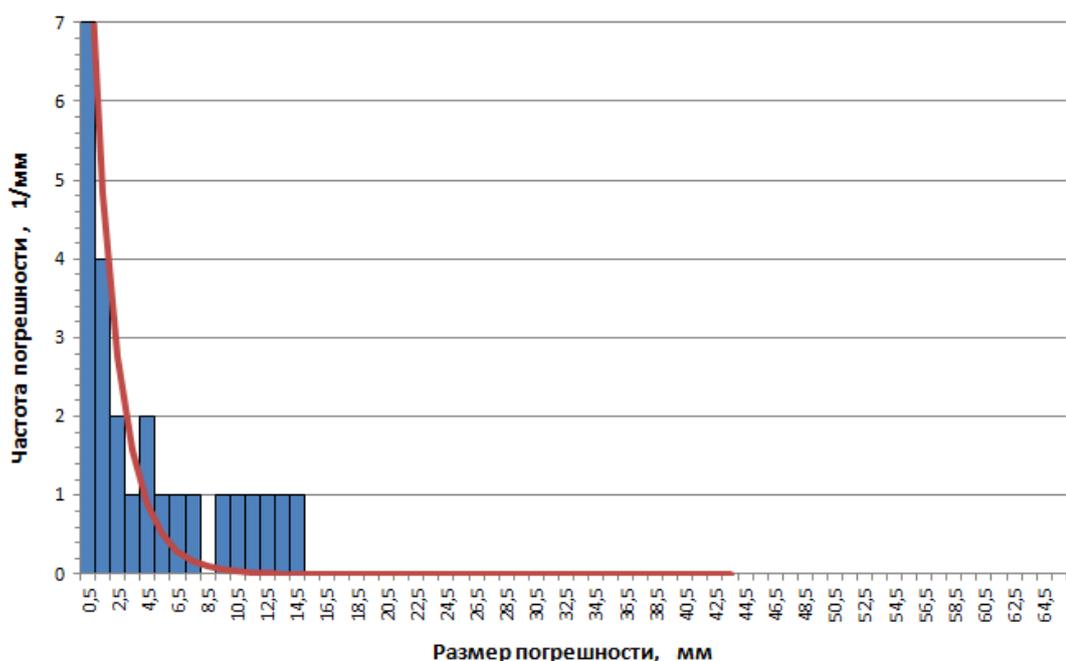


Рис. 4.4. Гистограмма частоты погрешности при контроле дефектов системой АВГУР 5.2 в зависимости от размера погрешности, а также кривая экспоненциального распределения, описывающая гистограмму

На основе анализа указанных результатов был определен запас 19,5 мм на размер дефекта в направлении толщины стенки, обеспечивающий возможность появления устойчивой протечки с вероятностью не более  $10^{-5}$ . Указанный запас на допустимый размер трещины в направлении толщины стенки (глубина дефекта) и коэффициент запаса 2 на протяженность максимального возможного сквозного устойчивого дефекта использованы при определении допустимых в эксплуатации размеров единичных дефектов.

Размеры в табл. 4.11 даны без учета времени предстоящей эксплуатации (времени до следующего контроля или ремонта).

Таблица 4.11

Предельно допустимые размеры для коротких дефектов

№/№ ПГ	Коллектор	Предельно допустимые размеры	
		максимальная протяженность, мм	максимальная глубина, мм
1	“хол.”	550,0	50,5
	“гор.”	550,0	49,5
2	“хол.”	539,0	48,5
	“гор.”	539,0	48,5
3	“хол.”	555,5	49,5
	“гор.”	550,0	49,5
4	“хол.”	531,9	46,0
	“гор.”	550,0	46,8
5	“хол.”	563,8	49,5
	“гор.”	563,8	49,5
6	“хол.”	536,3	47,3
	“гор.”	545,6	46,6

**Расчет критической длины трещины.** Критическая длина трещины рассчитывается решением следующего уравнения (раздел 2.2):

$$S_{Fm} \cdot Z(\sigma_m + \sigma_b) - \sigma_m = \frac{2\sigma_f}{\pi} (2 \sin \beta - \sin \theta), \quad (17)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{\nu}{\pi} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right).$$

Решением уравнения для  $\theta = 1,02$  рад получаем критическую длину шва  $S_{Fm}=1204$  мм.

Размер критической трещины является объективным инструментом оценки остаточного ресурса анализируемых сварных соединений – отношение разницы размеров (мм) сквозной трещины, обнаруживаемой стационарными системами контроля течи, и критической трещины к рассчитанной скорости (мм/год) развития дефекта в конечном итоге определяет временной запас безопасной эксплуатации данного элемента (с учетом коэффициента безопасности), т.е. цифровое выражение (в годах) его остаточного ресурса.

Результаты расчетов, выполненных в рамках обоснования приемлемости для ААЭС концепции “Течь перед разрушением” [95], показали, что

станционными системами контроля течи надежно выявляется истечение воды в бокс ПГ и ГЦН интенсивностью 38,0 л/мин (при коэффициенте безопасности 10). Для системы второго контура парогенераторов ААЭС рассчитанная длина сквозной трещины, соответствующая такой течи, равна 27 мм.

Для скорости утечки 380 л/мин (коэффициент безопасности 100) длина сквозной трещины составит 56 мм, а для течи интенсивностью 3800 л/мин (коэффициент безопасности 1000) соответствует длина трещины 152мм.

Максимальная длина выявленных дефектов в сварных соединениях №23 парогенераторов ААЭС равна 312 мм при глубине 46,6 мм. Развитие этой трещины до выходе на поверхность (до сквозной) приведет к истечению воды интенсивностью 22 671 л/мин.

На основании сопоставления размеров поверхностных (сквозных) трещин, надежно выявляемых станционными системами ААЭС, с размерами критической трещины (1204 мм) вероятность гильотинного разрыва оценивается, как существенно низкая.

#### **4.4.2. Результаты применения расчетов методом конечных элементов**

Основной подход расчета с помощью метода конечных элементов заключается в следующем. В соответствии с процедурой ASME для схематизации трещин, как и при аналитическом расчете, была постулирована трещина всей окружности с половинным углом  $\theta = \pi$ .

Глубина трещины, соответствующая самой глубокой трещине горячего коллектора ПГ-6, принята равной 48,4 мм (ультразвуковое испытание трещины 48,4 мм + 5 мм (погрешность УЗК метода)).

Для толщины стенки патрубка корпуса ПГ ААЭС (73,5 мм) относительная глубина повреждения сварного соединения составит  $53,4/73,5 = 72,6\%$ .

Поскольку напряжения при изгибе, вызванные трубопроводом, являются незначительными, они были опущены на этом этапе работы, и была создана симметричная модель. Коллектор первого контура считался свободным, не оказывая влияния на второй контур за счет внутреннего давления. Расчетными нагрузками приняты внутреннее давление и термические напряжения из-за различного расширения свариваемых материалов. Эти напряжения выше, чем внутренние напряжения давления. Упругопластический интеграл  $J$  (раздел 2.4) оценивался и сравнивался с самым низким значением для материала сварного соединения (сталь 10СН16N25АМ6)  $J_{0,2} = 81,2$  Н/мм.

Было рассчитано, что допустимый предел нагрузки достигается при увеличении давления в 6 раз, при котором значение  $J$  составляет 79 Н/мм.

Также, с точки зрения пластического разрушения, можно утверждать, что формируется местное пластическое разрушение в районе трещины. Если коэффициент прочности для мембранных напряжений для НУЭ считается равным 2,7 (раздел 2.2, табл. 2.2), разность можно оценить, как  $6/2,7 = 2,2$ .

Для гидроиспытаний на прочность давлением во втором контуре 7,65 МПа возможное увеличение давления составляет примерно 3,7 раза, что соответствует соотношению  $3,7/2,7=1,3$ .

Из вышесказанного можно утверждать, что проанализированная трещина четко соответствует разности напряжений. При аналитическом расчете близкое соответствие разности напряжений также может быть констатировано (за исключением испытания на прочность, где получено более низкое значение).

Влияние остаточных напряжений было оценено с помощью метода конечных элементов. Практическое измерение остаточного напряжения не было доступно, поэтому использовалась модель кривой, основанная на принципе равновесия. Был сделан вывод, что для глубоких трещин (74% толщины стенки) остаточные напряжения закрывают трещины, но их влияние очень мало.

Выполнена оценка дефектов, выявленных в разнородных сварных швах коллектора ПГ. Сварные швы на горячих коллекторах ПГ-5 и ПГ-6 подвергаются большой деградации. Трещины с максимальными глубинами 46,6 мм (2ПГ-5) и 48,4 мм (2ПГ-6) сопровождаются менее глубокими трещинами на большей части окружности с глубинами 27,5 мм (ПГ-5) и 29 мм (ПГ-6). Длина кольцевой трещины с максимальной глубиной составляет 312 мм (ПГ-5) и 130 мм (ПГ-6). Механизм деградации этого вида сварного шва объясняется в главе 3 на основе анализа результатов лабораторных испытаний АУЗК.

В связи с тем, что деградация металла сварных соединений №23 выявляется почти по всему периметру, дефект был систематизирован в соответствии с ASME, как полная кольцевая трещина с глубиной до 72,6% толщины стенки (измеренная минимальная глубина составляет 48,4 мм  $\pm$  5 мм – погрешность УЗК метода), т.е.  $53,4/73,5 = 72,6\%$  толщины стенки (73,5 мм).

Этот максимальный дефект был оценен аналитически на основе норм ASME и с помощью метода конечных элементов на основе вычисления J-интеграла по отношению к пластичности (раздел 2.4).

Анализ с помощью метода конечных элементов проводился для различных парогенераторов ВВЭР-440, результаты использованы в данной работе.

Метод конечных элементов продемонстрировал консерватизм аналитического решения, подтвердил важность термических напряжений и малую значимость теоретически ожидаемых остаточных напряжений. Результаты показывают актуальность анализа с помощью метода конечных элементов, и он должен быть продолжен в дальнейшем в ходе эксплуатации.

Решение о допустимой глубине одиночного дефекта менее консервативным методом конечных элементов предоставляет более реалистическое значение  $a/t = 0,74$ .

Для сварных соединений №23 Армянской АЭС при толщине сварного соединения 73,5 мм получаем для критической глубины дефекта значение  $[a] = 54,4 \text{ мм} (73,5 \times 0,74)$ .

#### **4.4.3. Методика расчетов “Норм дефектов для патрубков Ду-1100 в районе СС №23”**

На основании выполненного выше анализа разработана методика расчетов “Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 парогенераторов 2ПГ1÷6 энергоблока №2 Армянской АЭС” [96].

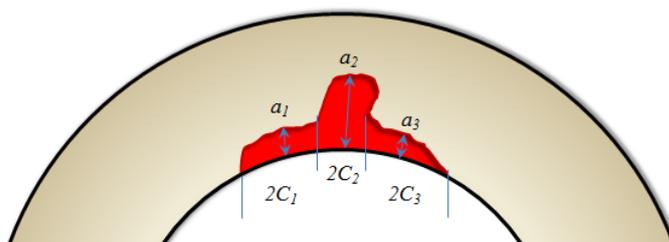
В методике принято, что все несплошности в районе СС №23 следует считать кольцевыми с протяженностью, равной периметру патрубка по внутреннему диаметру, то есть  $2c = 2\pi R$ , где  $2c$  – протяженность несплошности;  $R$  - внутренний диаметр патрубка Ду1100.

Глубину (размер в направлении толщины стенки патрубка) кольцевой несплошности  $a_{\text{кол}}$  определяют с учетом размеров всех единичных несплошностей ( $a_j ; c_j$ ), выявленных при контроле по периметру СС №23, а именно:

$$a_{\text{кол}} = \frac{\sum_{i=1}^k F_i}{2\pi R} , \quad (18)$$

где  $F_j$  - площадь единичного дефекта,  $\text{мм}^2$ ;  $k$  - количество единичных дефектов, выявленных в районе СС №23.

Допускается оценивать площадь единичного дефекта с учетом его фактической формы (рис. 4.5).



$$F = (a_1 \cdot 2C_1) + (a_2 \cdot 2C_2) + (a_3 \cdot 2C_3)$$

Рис. 4.5. Уточнение площади единичной несплошности в районе СС №23

Глубина кольцевой несплошности должна быть не больше допустимой величины  $[a_{кол}]$ , устанавливаемой в табл. 4.12 в зависимости от времени предстоящей эксплуатации до следующего контроля:

$$a_{кол} \leq [a_{кол}].$$

Глубина единичной несплошности  $a_j$  должна быть не более величины  $[a_{единичн}]$ , устанавливаемой в табл. 4.12 в зависимости от времени предстоящей эксплуатации до следующего контроля:

$$a_j \leq [a_{единичн}].$$

При условии, что её протяженность  $2c_j$  не превышает величину 312 мм, на энергоблоке установлены три независимые системы контроля протечки в районе СС № 23 с чувствительностью 3,8 литров в минуту.

Таблица 4.12

Нормы кольцевого и единичного дефекта

Глубина несплошности, мм	Время предстоящей эксплуатации до следующего неразрушающего контроля или ремонта по его результатам			
	1 год	2 года	3 года	4 года
$[a_{единичн}]$	45	43	41	39
$[a_{кол}]$	19	18	17	16

Выполнение положений настоящего методики обеспечивает надежность эксплуатации до следующего контроля и ремонта по его результатам патрубков

Ду-1100 в районе СС №23 по критерию сопротивления разрыву полным сечением с вероятностью разрыва менее  $10^{-7}$  и вероятностью образования обнаруживаемой протечки через устойчивую сквозную несплошность – меньше  $10^{-5}$  за тот же период эксплуатации до очередного контроля.

#### **4.4.4. Оценка остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов ВВЭР-440**

С учетом значимости парогенераторов, как оборудования реакторной установки, в вопросах надежной и безопасной эксплуатации энергоблока АЭС весьма ответственной задачей становится оценка остаточного ресурса наиболее проблемного узла парогенератора.

Целостность корпуса парогенератора в большей степени определяется состоянием сварных соединений №23.

Остаточный ресурс сварных соединений - конструктивно достаточно простых элементов, в первом приближении определяется размерами выявленных дефектов и скоростью их развития [96].

Числовое значение остаточного ресурса (максимальное время безопасной эксплуатации) рассчитывается по формулам с выбором наименьшего значения:

$$T_S = (S - a_i)/V_S, \quad T_C = (a_r - c_i)/V_C, \quad (19)$$

где  $T$  - остаточный ресурс, год;  $S$  - толщина СС, мм;  $a_i$  - глубина выявленного дефекта, мм;  $a_r$  - критическая длина единичного дефекта, мм;  $c_i$  - длина выявленного дефекта, мм;  $V_S, V_C$  - скорость развития дефекта по глубине и длине, мм/год.

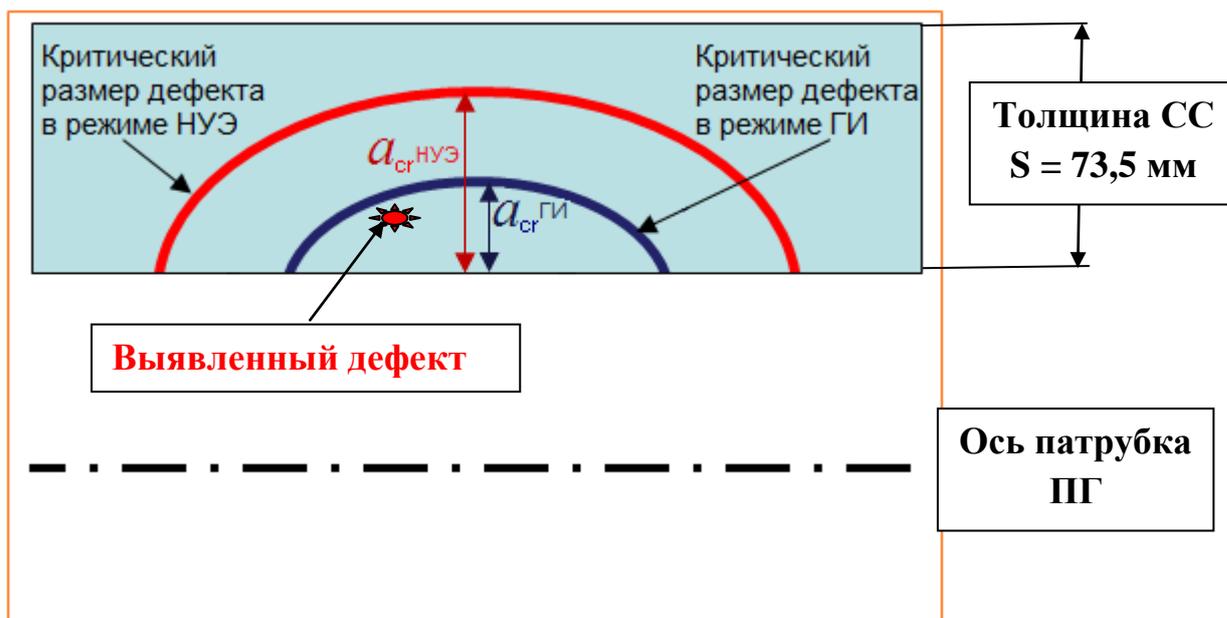


Рис. 4.6. Схема расположения критических размеров дефектов в стенке патрубка при различных режимах эксплуатации

Успешно проведенные ГИ подтверждают, что в патрубке дефекты с размером больше чем  $a_{crGI}$  отсутствуют, но могут быть дефекты меньше чем  $a_{crGI}$  (рис. 4.6).

Эти дефекты могут подрастать и достигать  $a_{crNUZ}$ . В этом случае существует вероятность разрыва патрубка.

Средняя скорость развития дефекта по глубине толщине СС для 2ПГ-6 равна

$$\frac{a_{\max} + a_{\min}}{2\tau_{\text{экс}}} = \frac{48,4 + 0}{2 * 34} = 0,71(\text{мм} / \text{год}), \quad (20)$$

где  $a_{\min} = 0$ , поскольку рассматриваемый дефект консервативно принят круговым (длина равна периметру) с глубиной, равной максимальной глубине выявленного дефекта;  $a_{\max}$  - трещина с максимальной глубиной 48,4 мм (2ПГ-6);  $\tau_{\text{экс}}$  - срок эксплуатации ААЭС.

Остаточный ресурс элемента понимается как период, в течение которого обеспечено выполнение элементом проектных функций; для сварного соединения - это целостность (плотность и прочность).

Поскольку рассматриваемый дефект консервативно принят круговым (длина равна периметру) с глубиной, равной максимальной глубине выявленного дефекта, целостность сварного соединения обеспечена при подтвержденном отсутствии дефектов, глубина которых равна критической глубине, рассчитанной для соответствующего режима эксплуатации.

Значения  $a_{crНУЭ} = 66$  мм и  $a_{crГИ} = 62$  мм (Приложение 2) сравниваются с измеренными значениями реального (выявленного) дефекта:  $a_i = 48,4$  мм.

Отношение выявленной разницы фактической и критической глубин дефекта к скорости развития (подроста) дефекта дает числовое значение остаточного ресурса [96]:

$$T_{ГИ} = \frac{62 - 48,4}{0,71} = 19 \text{ лет}$$

$$T_{НУЭ} = \frac{66 - 48,4}{0,71} = 24 \text{ года}$$

Для обеспечения требуемого консерватизма следует основываться на доказанной гидравлическими испытаниями глубине возможного дефекта – положительные результаты ГИ исключают наличие дефектов с глубиной, равной или большей, чем  $a_{crГИ}$ .

При таком подходе, принимая  $a_i = a_{crГИ}$ , получаем значение остаточного ресурса СС для условий нормальной эксплуатации:

$$T_э = \frac{66 - 62}{0,71} = 5,6 \text{ лет.}$$

После каждого успешного ГИ значение этого ресурса остается неизменным.

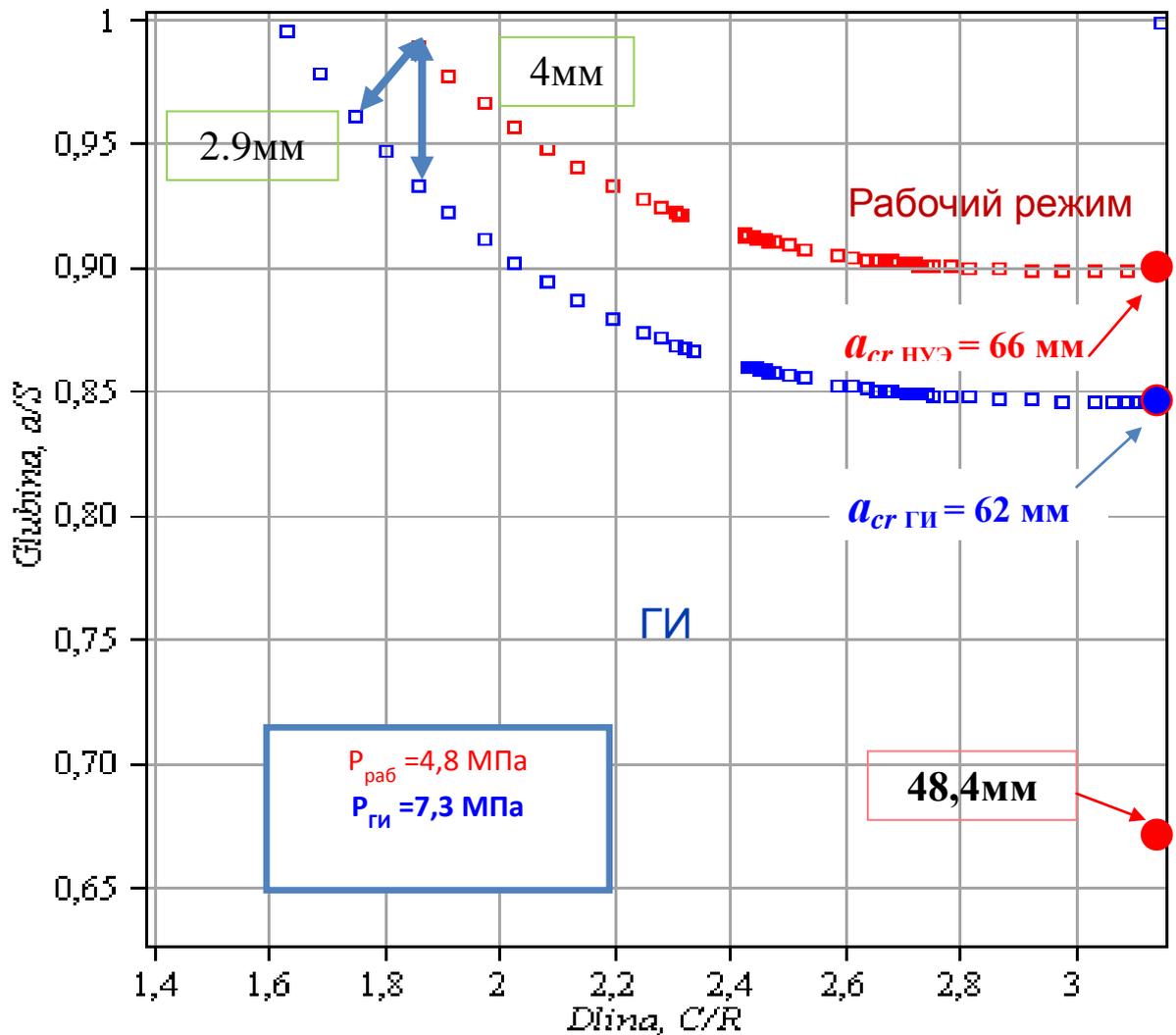


Рис. 4.7. Оценка безопасности эксплуатации патрубка в районе СС №23 2ПГ-6 ААЭС (с учетом выявленного дефекта с глубиной 48,4 мм)

Координаты: по вертикали –  $a/S$  относительная глубина дефекта;

по горизонтали –  $C/R$  протяженность дефекта в радианах.

На рис. 4.7 показаны критические размеры дефектов в режимах ГИ и НУЭ. Красной точкой показан выявленный дефект в предположении, что он является кольцевым. Расстояние между кривыми на рисунке по вертикали составляет 4 мм, или, если трещина растет в глубину и длину одновременно, то тогда

2,9 мм. Видно, что этот дефект существенно ниже критических размеров. Время, за которое  $a_{срГИ}$  достигнет величины  $a_{срНУЭ}$ , - это время безопасной эксплуатации сварного соединения №23, когда разрыв патрубка принципиально невозможен.

#### **4.4. Выводы по четвертой главе**

1. Обосновано, что возможный гильотинный разрыв переходной втулки узла крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов вследствие развития анализируемого дефекта сварного соединения №23 мало чем отличается от любой другой течи из системы 2-го контура в помещении бокса ПГ и ГЦН. На ВВЭР-440 АЭС имеются технические средства для своевременного обнаружения такой аварии. При гильотинном разрыве проектные технические средства безопасности автоматически локализуют поврежденный ПГ без вмешательства персонала, с последующим восстановлением всех параметров 1-го и 2-го контуров и переводом энергоблока в стабильное безопасное состояние.
2. Обосновано, что для ситуации с частичным повреждением сварного соединения №23 на ВВЭР-440 АЭС имеются адекватные инструкции, позволяющие персоналу перевести реакторную установку в безопасное состояние с учетом рассматриваемого события.
3. Установлено, что на основании сопоставления размеров поверхностных (сквозных) трещин, надежно выявляемых стационарными системами ААЭС, с размерами критической трещины (1204 мм) вероятность гильотинного разрыва оценивается, как существенно низкая.
4. Доказано, что максимальная длина выявленных дефектов в сварных соединениях №23 парогенераторов ААЭС равна 312 мм при глубине 48,4

мм. Развитие этой трещины до выхода на поверхность (до сквозной) приведет к истечению воды интенсивностью 22 671 л/мин.

5. Разработана методология оценки критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей в режимах НУЭ, ГИ на прочность и НУЭ+МРЗ для всех 12 патрубков Ду-1100 в районе СС23.
6. Доказано, что максимально возможный подрост трещины по периметру патрубка в районе сварного шва №23 ААЭС не превышает 0,71 мм в год.
7. На основании выполненного анализа разработана методика расчетов “Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 парогенераторов ПГВ-4с”.
8. Определено, что значение остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов атомных энергоблоков ВВЭР-440 для условий нормальной эксплуатации составляет 5,6 лет.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Показано, что в сочетании с циклическими нагрузками, нагрузки, вызванные разницей коэффициентов линейного расширения между аустенитными и перлитными металлами СС ПГВ-4с, в условиях многолетней эксплуатации вызывают образование и развитие трещин.
2. Доказано, что в СС Ду-1100 “горячих” коллекторов 2ПГ-5 и 2ПГ-6 энергоблока № 2 ААЭС выявлены недопустимые по нормам оценки качества несплошности.
3. Обосновано, что возможный гильотинный разрыв переходной втулки узла крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов вследствие развития анализируемого дефекта сварного соединения №23 мало чем отличается от любой другой течи из системы 2-го контура в помещении бокса ПГ и ГЦН.
4. Впервые разработана методология расчетов критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей в режимах НУЭ, НУЭ+МРЗ и ГИ на прочность и на плотность для всех патрубков Ду-1100 в районе СС23 ПГВ-4с.
5. Доказано, что максимальная длина выявленных дефектов в сварных соединениях №23 парогенераторов ПГВ-4с равна 312 мм при глубине 46,6 мм. Развитие этой трещины до выхода на поверхность (до сквозной) приведет к истечению воды интенсивностью 22 671 л/мин.
6. Разработана методика расчетов “Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 парогенераторов реакторных установок ВВЭР-440”.
7. Установлено, что максимально возможный поперек трещины по периметру патрубка в районе сварного шва №23 не превышает 0,71 мм в год, и оценено значение остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов ПГВ-4с ВВЭР-440.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1978. -168 с.
2. Մահալյան Ա.Պ., Մարուխյան Ռ.Զ., Պետրոսյան Վ.Գ. ՋՋԷՌ-440 ռեակտորներով էներգաբլոկի սարքավորումները և շահագործման ռեժիմները. - Երևան: ՀԱՊՀ, 2017,- 282 էջ:
3. Удостоверение о качестве изготовления сосуда. Заводской №5540, Парогенератор ПГВ-4М. Дата изготовления: август 1969 г. Машиностроительный завод им. Орджонекидзе (ЗиО).
4. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка, основные положения ПНАЭ Г-7-009-89. Введ. 1.06.1990 г.
5. Ходаков В.Д., Зубченко А.С. Опыт эксплуатации и ремонта разнородных сварных соединений оборудования и трубопроводов из аустенитных и перлитных сталей. Вопросы атомной науки и техники. – 2008. -Выпуск 23. Реакторный установки ВВЭР-1000.
6. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей. – М., Л.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
7. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, М.Б Бакиров, А.Ф Гетман и др. – М., 2008. – 445 с.
8. Резинских В.Ф., Гринь Е.А. Современные проблемы обеспечения безопасности тепломеханического оборудования при продлении сроков его службы // Теплоэнергетика. - 2013. - №1. - С. 17.
9. Судаков А.В., Слоцов С.В. Современные методы оценки прочности и ресурса энергооборудования при термопульсациях и вибрациях // Теплоэнергетика. - 2013. - №1. - С. 55.

10. Разработка программных средств и нормативной документации по эрозионно-коррозионному износу трубопроводов на АЭС / В.И. Бараненко, А.А. Просвирнов, С.В. Европин, А.А. Арефьев и др. // Теплоэнергетика. - 2012. - №5. - С. 34.
11. Опыт проведения восстановительной термической обработки штампосварных колен из стали 15X1M1Ф после длительной эксплуатации / Р.Н. Калугин, Ф.А. Хромченко, Т.А. Швецова, К.К. Крейцер и др. // Теплоэнергетика. - 2012. - №4. - С. 22.
12. Ланин А.А. Подходы к конструктивно-технологическому проектированию сварных узлов мощных энергетических установок // Теплоэнергетика. - 2012. - №3. - С. 43.
13. Проблемы локальной эрозиикоррозии сварных соединений трубопроводов энергоблоков АЭС / Г.В. Томаров, В.Н. Ловчев, Д.Ф. Гуцев и др. // Теплоэнергетика. - 2012. - №8. - С. 57.
14. Трунов Н.Б., Рыжов С.Б., Давиденко С.Е. Горизонтальные парогенераторы: проблемы и перспективы // Теплоэнергетика. - 2011. - №3. - С. 2-5.
15. Современное состояние проблемы управления ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР. э. / Н.Б. Трунов, С.Е. Давиденко, В.С. Попадчук, Н.Н. Давиденко и др. // Теплоэнергетика. - 2011. - №3. - С. 6-10.
16. Петров Г.Л. Неоднородность металла сварных соединений. – Л.: Судпрогиз, 1963. - 206 с.
17. Ерохин А.А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. - М.: Машиностроение, 1964. - 252 с.
18. Шубин Ф.В. Сварка разнородных сварных соединений. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т./Под ред. А.И. Акулова. - Том 1. - М.: Машиностроение, 1978. - 504 с.

19. Бельчук Г.А., Земзин В.Н. Сварка разнородных сварных соединений. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т./Под ред. А.И. Акулова. - Том 2. - М.: Машиностроение, 1978. - 462 с.
20. Schaffler A.L. Selection of Austenetic Electrode for welding Dissimilar Metals Welding Journal. - 1947. - V.26, N 10. P.601 - 620.
21. De Long W.T. Ostrom G.A. Stumachowsky. Measurement and Calculation of Ferrite in Stainless Steel // Welding Journal. – 1956. - V.35, N 11. - P.285 - 301.
22. Закс И.А. Сварка разнородных сталей.-И.: Машиностроение, 1973. - 208 с.
23. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по ТЗЗ спец. “Оборуд. и технология сварочн. пр-ва”/В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высш. шк. 1988. - 559 с.
24. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. – Киев: Техника, 1968. – 562с.
25. Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок ОП1513-72. - 1972 г.
26. Технические условия AWS (American Welding Society) A5.9-93.
27. Технический отчет о научно-исследовательской работе по договору № 2007/4.1.1.1.10.8/24025 от 14.09.2007 “Сопровождение и поддержка работ по ЭНК на АЭС. Исследование характера и причин повреждения сварного соединения №23 ЗПГ-1 Нововоронежской АЭС”. - М., 2007. - 55 с.
28. Ходаков В.Д., Харина И.Л., Корнеев А.Е. Анализ опыта эксплуатации и ремонта сварных соединений аустенитного и перлитного класса (разнородных сварных соединений) оборудования и трубопроводов АЭС // Материалы 10-й Международной конференции. - Том 2 /ФГУП ЦНИИ “Прометей”, -СПб., Россия, октябрь 2008.
29. Ходаков В.Д., Харина И.Д., Корнеев А.Е. Исследование характера и причины повреждений разнородных сварных соединений узла приварки

переходного кольца к патрубку Ду-1100ПГВ Нововоронежской и Кольской АЭС // Материалы 10-й Международной конференции. - Том 2 /ФГУП ЦНИИ “Прометей”, -СПб., Россия, октябрь 2008.

30. М.А. Гальперин, Т. И. Иванова, К.К. Младзиевский, Е.Е. Старец, и др. Проверка протектирующего действия перлитной стали на межкристаллитную коррозию аустенитного металла наплавки / М.А. Гальперин, Т. И. Иванова, К.К. Младзиевский, Е.Е. Старец и др. //Сварка: Сб. статей. – Л.: Судостроение, 1971. – С. 265.
31. Харченко С.А., Трунов Н.Б., Коротаев Н.Ф. Меры по обеспечению надежности сварного соединения коллектора I контура с корпусом парогенератора АЭС с ВВЭР-1000//Теплоэнергетика. - 2011. - №3. - С. 27-32.
32. Томаров Г.В., Шипков А.А. Эрозионно-коррозионный вынос железосодержащих соединений — источник отложений в парогенераторах АЭС с ВВЭР// Теплоэнергетика. - 2011. - №3. - С. 54-61.
33. Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А., Туголуков Е.А. Длительная прочность и структурные особенности сварных соединений хромистых сталей// Теплоэнергетика. - 2010. - №1. - С. 9-14.
34. Попов А.Б. Особенности напряженного состояния и оценка ресурса штампосварных колен паропроводов горячего промперегрева энергоблоков 500 МВт // Теплоэнергетика. - 2010. - №11. - С. 70-75.
35. Анохов А.Е., Гринь Е.А., Перевезенцева Т.В., Федина И.В. Характер и причины разрушения сварных соединений паропроводов горячего промперегрева энергоблоков мощностью 800 МВт // Теплоэнергетика. - 2009. - №2. - С. 20-26.
36. Рыженков В.А., Селезнев Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б. Экспериментальное исследование эрозионного износа конструкционных материалов // Теплоэнергетика. - 2014. - №8. - С. 56.

37. Учет внутрискруктурных напряжений в процессах влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб / Любимова Л.Л., Макеев А.А., Загорин А.С., Ташлыков А.А. и др. //Теплоэнергетика. - 2014. - №8. - С. 62.
38. Рыженков В.А., Селезнев Л.И., Рыженков А.В. Исследование процессов эрозионного износа конструкционных материалов//Теплоэнергетика. - 2014. - №10. - С. 44.
39. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Рыженков А.В., Качалин Г.В. Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии // Теплоэнергетика. - 2014. - №11. - С. 29.
40. Игнатов Б.А., Строкан Б.В., Рохлин Э.А., Хачатурянц Л.В. Обоснование замены перлитных электродов марки УОНИ 13/45 на аустенитные марки ЭА 855/51 для приварки выпусков к корпусам парогенераторов ПГВ-1000 из стали марки 10ГН2МФА. – Л., 1972.
41. Заключение №532/2007 от 12.06.07 года по АУЗК с применением системы АВГУР 5.2.
42. ПН АЭ Г 7-010-89. Оборудования и трубопроводы АЭС. Правила контроля. – М., 1990. - 77 с.
43. Решение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору “О ремонте сварных соединений №23 патрубков Ду1100 парогенератора №1(ЗПГ-1) энергоблока №3 Нововоронежской АЭС №НВАЭС ЗР-78 (1.7)2007” от 11.07.2007.
44. Типовая технологическая инструкция №060100.025000ТИ2750401-00212179: “Ремонт разнородных сварных соединений приварки переходных втулок из стали 08Х18Н10Т к патрубкам Ду1100 из стали 22К узла крепления ПГВ-4М, ПГВ-4Э, ПГВ-2В энергоблоков ВВЭР- 440” (редакция 2007 года).

45. Заключение о характере повреждения металла сварного соединения №23«г» узла приварки переходного кольца к патрубку Ду-1100 парогенератора 2ПГ-4 Кольской АЭС. – М., 2007. - 10 с.
46. Типовая Технологическая инструкция № 060200.025000ТИ2760179-00212179 “Парогенератор ПГВ-1000. Ремонт с использованием сварки узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку парогенератора (сварные швы №111 (76,77)”. - 2008.
47. Заключение “О характере повреждения металла сварного соединения №23 “х” узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду-1100 парогенератора 3ПГ-1 Нововоронежской АЭС”. - М., ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», 2007. - 9 с.
48. Ходаков Д.В. Исследование и разработка технологии ремонта разнородных сварных соединений узла крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов ПГВ – 440 / Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО “ЦНИИТМАШ”. - 2012.
49. Исследование коррозионной стойкости сварочных материалов для выполнения разнородных сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС / В.Д. Ходаков, И.Л. Харина, Е.Г. Старченко, Д.В. Ходаков и др. // Тяжелое машиностроение. - 2012. - №6. - с. 17-25.
50. Vardanyan A., Petrosyan V., Kryukov A., Sevikyan G. - Irradiation embrittlement assessment and prediction of Armenian NPP reactor pressure vessel steels // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 272. - P. 28-35.
51. Варданян А.М. Причины образования повреждений сварных соединений приварки коллекторов к корпусу парогенераторов ПГВ-440// Вестник ИАА. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 263-270.
52. Ходаков Д.В., Ходаков В.Д., Харина И.Л. Сравнительные исследования коррозионной стойкости сварочных материалов, используемых для

выполнения первого (переходного) слоя разнородных сварных соединений перлитных и аустенитных сталей атомно-энергетического оборудования//Материалы VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. “Сварка и родственные технологии”. – Киев: ИЭС им. Патона, 2011. – 263с.

53. Тихонов Д.С. Технический отчет “Результаты автоматизированного неразрушающего контроля разнородных сварных соединений Ду-1100 АЭС”. - 23.10.2014.
54. Базулин Е.Г. Разработка системы эксплуатационного ультразвукового неразрушающего контроля повышенной информативности с применением антенных решёток. – М., 2014. – 346с.
55. Гурвич А.К. Способы сканирования при ультразвуковом контроле // В мире неразрушающего контроля. - 2010. - № 3. - С. 4-6.
56. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей / А.Е. Базулин и др.// В мире неразрушающего контроля. - 2010. - №1. - С. 35-41.
57. Зайнуллин Ф.Р. Ультразвуковой контроль толщины стенок деталей априорно неизвестной конфигурации: Дис. ... канд. техн. наук. - Казань, 2001. - 106 с.
58. Алешин Н.П., Вадковский Н.Н., Волкова Н.Н. Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации повышения надежности // Дефектоскопия. - 1988. - №2. - С. 43-59.
59. Алешин Н.П., Горная С.П. Новый подход к оптимизации УЗК аустенитных сварных швов //В мире неразрушающего контроля. - 2003. - №1. - С. 16-18.
60. Гребенников В.В., Гурвич А.К. Состояние и проблемы ультразвукового контроля аустенитных сварных швов // Дефектоскопия. - 1985. - №9. - С. 3-12.

61. Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС / В.Г. Бадалян и др. // Дефектоскопия. - 2001. - № 1. - С. 58-65.
62. Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г. Эволюция средств и методов определения формы и размеров дефектов при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. - 2003. - № 2 (56). - С. 6-27.
63. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. - М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2000. - 496 с.
64. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алёшин, В.Е. Белый, А.Х. Вopilкин и др. - М.: Машиностроение, 1989. -152 с.
65. Григорьев М.В., Гребенников В.В., Гурвич А.К. Определение размеров трещин ультразвуковым методом // Дефектоскопия. - 1978. - № 1. - С. 8-12.
66. Гребенников В.В., Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Гребенников Д.В., Сравнительный анализ способов повышения отношения сигнал/шум при ультразвуковом контроле аустенитных швов // Контроль. Диагностика. - 2000. - № 9 (27). - С. 29 - 35.
67. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Новый подход к ультразвуковому неразрушающему автоматизированному контролю ответственных сварных соединений // Контроль. Диагностика. - 1999. - № 10. - С. 23-31.
68. Тихонов Д.М. Разработка методов и аппаратуры для ультразвуковой дефектометрии сварных соединений трубопроводов АЭС. – М.: - 2004. - 189с.
69. Porter R.P., Devaney A.J. Generalized holography and computational solutions to inverse source problem // J. of Optical Society of America. – 1982. - Vol. 72, issue 12. - P. 1707-1713.
70. Synthetic aperture focusing technique signal processing / K.J. Langenberg, M. Berger, Th. Kreutter, et al // NDT Int. – 1986. - Vol. 19, N 3. - P. 177-189.

71. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 4.4: Руководство по эксплуатации. 002.00.РЭ. М.: НПЦ «ЭХО+», 2001. - 41 с.
72. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть 2: Контроль сварных соединений и наплавки. ПНАЭ Г-7-014-89. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. - 158 с.
73. Сопроводительный справочник к Нормам ASME по котлам и сосудам давления. – М., 2006. – 170с.
74. BPVC Section IV – Rules for Construction of Heating Boilers ASME, 2010.
75. BPVC Section VI - Recommended Rules for the Care and Operation of Heating Boilers ASME, 2010.
76. BPVC Section II-Materials Part C-Specifications for Welding Rods Electrodes and Filler Metals (BPVC-IIC - 2015).
77. BPVC Section II-Materials-Part A-Ferrous Materials Specifications (2 Volumes) (BPVC-IIA - 2015).
78. BPVC Section II-Materials-Part B-Nonferrous Material Specifications (BPVC-IIB - 2015).
79. Pressure Gauges and Gauge Attachments (B40.100 - 2013).
80. Москалев Н.С., Пронозин Я.А. Металлические конструкции. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. - 344 с.
81. Муханов К.К. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1978. - 572 с.
82. Вopilкин А.Х. Последовательность перераспределения моментов в заземленной балке. Статический способ метода предельного равновесия - М.: ЦНИИАтоминформ, 1998. – 212 с.

83. Cherepanov G. P. The propagation of cracks in a continuous medium// Journal of Applied Mathematics and Mechanics – 1967. - 31(3). - P. 503–512.
84. Rice J.R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks//Journal of Applied Mechanics. – 1968. – 35. - P. 379–386.
85. Meyers and Chawla //Mechanical Behavior of Materials. – 1999. - P. 445–448.
86. Yoda, M. The J-integral fracture toughness for Mode II//Int. J. of Fracture. – 1980. - 16(4). - P. R175–R178.
87. Ivan B. Results of UT NDE of the Dissimilar welds of WWER440 SG secondary collectors by Pulse-Echo technique //Doc. ÚJV Řež, a. s. - 2003.
88. Варданян А.М. Экспериментальное исследование сварных швов парогенераторов второго энергоблока Армянской АЭС // ВЕСТНИК НПУА Электротехника, Энергетика. – 2016. - №1. - С. 86-96.
89. Ondřej H. NDT examination and evaluation results of SG secondary collectors at VVER 440 ANPP by Phased array//Doc. ÚJV Řež, a. s. - 2014.
90. АКТ № 01. По результатам исследования неразрушающими методами контроля в процессе проведения выборки поврежденного сварного соединения № 23 “горячего” коллектора Ду-1100 парогенератора 2ПГ-5 энергоблока № 2 Армянской АЭС. 11.10.2014г.
91. АКТ № 02. По результатам исследования неразрушающими методами контроля в процессе проведения выборки поврежденного сварного соединения № 23 “горячего” коллектора Ду-1100 парогенератора 2ПГ-6 энергоблока № 2 Армянской АЭС. 15.10.2014г.
92. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
93. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник /Под ред. Б.Е. Неймарка. – М., Л.: Энергия, 1967. – 240с.

94. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов АЭС на стадии их эксплуатации. РД ЭО 0330-01. – М.: - 2001.
95. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов АЭС». – М.: Энергоатомиздат, 1999.
96. Петросян В.Г., Варданян А.М. Оценка остаточного ресурса узлов крепления коллекторов теплоносителя к патрубкам корпусов парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440// Вестник ИАА. – 2017. – Т. 14, № 2. – С. 215-218.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗВИТИЕМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ**

**ГЛУБИН ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ №23 ПГ ААЭС**

Таблица П.1.1

Допустимые напряжения изгиба для материала сварного шва “горячей” нитки  
22К и условия НУЭ+МРЗ

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,22E+08	1,13E+08
0,12	4,16E+08	1,11E+08
0,14	4,10E+08	1,09E+08
0,16	4,04E+08	1,07E+08
0,18	3,98E+08	1,05E+08
0,2	3,91E+08	1,03E+08
0,22	3,85E+08	1,01E+08
0,24	3,78E+08	9,95E+07
0,26	3,71E+08	9,74E+07
0,28	3,64E+08	9,53E+07
0,3	3,56E+08	9,31E+07
0,32	3,49E+08	9,09E+07
0,34	3,41E+08	8,86E+07
0,36	3,34E+08	8,62E+07
0,38	3,25E+08	8,38E+07
0,4	3,17E+08	8,13E+07
0,42	3,09E+08	7,88E+07
0,44	3,00E+08	7,62E+07
0,46	2,91E+08	7,36E+07
0,48	2,82E+08	7,08E+07
0,5	2,73E+08	6,80E+07
0,52	2,63E+08	6,52E+07
0,54	2,53E+08	6,22E+07
0,56	2,43E+08	5,92E+07
0,58	2,33E+08	5,61E+07
0,6	2,22E+08	5,30E+07
0,62	2,11E+08	4,97E+07
0,64	2,00E+08	4,64E+07
0,66	1,89E+08	4,30E+07
0,68	1,77E+08	3,95E+07
0,7	1,66E+08	3,60E+07

0,72	1,53E+08	3,24E+07
0,74	1,41E+08	2,87E+07

Таблица П.1.2

Допустимые напряжения изгиба для материала сварного шва холодной нитки  
22К и условия НУЭ+МРЗ

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,22E+08	1,13E+08
0,12	4,16E+08	1,11E+08
0,14	4,10E+08	1,09E+08
0,16	4,04E+08	1,07E+08
0,18	3,98E+08	1,06E+08
0,2	3,91E+08	1,04E+08
0,22	3,85E+08	1,02E+08
0,24	3,78E+08	9,97E+07
0,26	3,71E+08	9,77E+07
0,28	3,64E+08	9,56E+07
0,3	3,57E+08	9,34E+07
0,32	3,49E+08	9,12E+07
0,34	3,42E+08	8,89E+07
0,36	3,34E+08	8,65E+07
0,38	3,26E+08	8,41E+07
0,4	3,18E+08	8,17E+07
0,42	3,09E+08	7,91E+07
0,44	3,00E+08	7,66E+07
0,46	2,92E+08	7,39E+07
0,48	2,82E+08	7,12E+07
0,5	2,73E+08	6,84E+07
0,52	2,64E+08	6,55E+07
0,54	2,54E+08	6,26E+07
0,56	2,44E+08	5,96E+07
0,58	2,33E+08	5,65E+07
0,6	2,23E+08	5,33E+07
0,62	2,12E+08	5,01E+07
0,64	2,01E+08	4,68E+07
0,66	1,90E+08	4,34E+07

0,68	1,78E+08	3,99E+07
0,7	1,66E+08	3,64E+07
0,72	1,54E+08	3,28E+07
0,74	1,42E+08	2,91E+07

Таблица П.1.3

Допустимое напряжение изгиба сварного шва горячей нитки для материала  
04X19H11M3 и условия НУЭ+МРЗ

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,14E+08	1,49E+08
0,12	4,09E+08	1,47E+08
0,14	4,03E+08	1,44E+08
0,16	3,97E+08	1,42E+08
0,18	3,91E+08	1,40E+08
0,2	3,84E+08	1,37E+08
0,22	3,78E+08	1,35E+08
0,24	3,71E+08	1,32E+08
0,26	3,64E+08	1,29E+08
0,28	3,57E+08	1,27E+08
0,3	3,50E+08	1,24E+08
0,32	3,43E+08	1,21E+08
0,34	3,35E+08	1,18E+08
0,36	3,28E+08	1,15E+08
0,38	3,20E+08	1,12E+08
0,4	3,11E+08	1,09E+08
0,42	3,03E+08	1,06E+08
0,44	2,95E+08	1,02E+08
0,46	2,86E+08	9,90E+07
0,48	2,77E+08	9,55E+07
0,5	2,68E+08	9,19E+07
0,52	2,58E+08	8,82E+07
0,54	2,48E+08	8,45E+07
0,56	2,39E+08	8,07E+07
0,58	2,28E+08	7,67E+07
0,6	2,18E+08	7,27E+07
0,62	2,07E+08	6,85E+07
0,64	1,96E+08	6,43E+07
0,66	1,85E+08	6,00E+07
0,68	1,74E+08	5,56E+07
0,7	1,62E+08	5,11E+07
0,72	1,50E+08	4,65E+07
0,74	1,38E+08	4,17E+07

Таблица П.1.4

Допустимое напряжение при изгибе для сварочного шва горячей нитки,  
материал 22К, и условия НУЭ

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,22E+08	6,11E+07
0,12	4,16E+08	6,01E+07
0,14	4,10E+08	5,90E+07
0,16	4,04E+08	5,79E+07
0,18	3,98E+08	5,67E+07
0,2	3,91E+08	5,56E+07
0,22	3,85E+08	5,44E+07
0,24	3,78E+08	5,32E+07
0,26	3,71E+08	5,19E+07
0,28	3,64E+08	5,06E+07
0,3	3,57E+08	4,93E+07
0,32	3,49E+08	4,79E+07
0,34	3,42E+08	4,65E+07
0,36	3,34E+08	4,51E+07
0,38	3,26E+08	4,37E+07
0,4	3,18E+08	4,22E+07
0,42	3,09E+08	4,06E+07
0,44	3,01E+08	3,90E+07
0,46	2,92E+08	3,74E+07
0,48	2,83E+08	3,58E+07
0,5	2,73E+08	3,41E+07
0,52	2,64E+08	3,23E+07
0,54	2,54E+08	3,05E+07
0,56	2,44E+08	2,87E+07
0,58	2,33E+08	2,68E+07
0,6	2,23E+08	2,49E+07
0,62	2,12E+08	2,29E+07
0,64	2,01E+08	2,09E+07
0,66	1,90E+08	1,89E+07
0,68	1,78E+08	1,68E+07
0,7	1,66E+08	1,46E+07
0,72	1,54E+08	1,24E+07
0,74	1,42E+08	1,02E+07

Таблица П.1.5

Допустимое напряжение при изгибе для сварочного шва горячей нитки,  
материал 22К, испытание на плотность

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,19E+08	5,46E+07
0,12	4,13E+08	5,35E+07
0,14	4,07E+08	5,23E+07
0,16	4,00E+08	5,12E+07
0,18	3,94E+08	5,00E+07
0,2	3,87E+08	4,88E+07
0,22	3,80E+08	4,75E+07
0,24	3,73E+08	4,62E+07
0,26	3,66E+08	4,49E+07
0,28	3,59E+08	4,36E+07
0,3	3,51E+08	4,22E+07
0,32	3,43E+08	4,08E+07
0,34	3,35E+08	3,93E+07
0,36	3,27E+08	3,78E+07
0,38	3,19E+08	3,63E+07
0,4	3,10E+08	3,47E+07
0,42	3,01E+08	3,31E+07
0,44	2,92E+08	3,15E+07
0,46	2,83E+08	2,98E+07
0,48	2,73E+08	2,81E+07
0,5	2,64E+08	2,63E+07
0,52	2,54E+08	2,45E+07
0,54	2,44E+08	2,27E+07
0,56	2,33E+08	2,08E+07
0,58	2,23E+08	1,88E+07
0,6	2,12E+08	1,68E+07
0,62	2,00E+08	1,48E+07
0,64	1,89E+08	1,27E+07
0,66	1,77E+08	1,06E+07
0,68	1,65E+08	8,42E+06
0,7	1,53E+08	6,21E+06
0,72	1,41E+08	3,95E+06
0,74	1,28E+08	1,65E+06

Таблица П.1.6

Допустимое напряжение при изгибе для сварочного шва горячей нитки,  
материал 22К, испытание на прочность

$a/t$	$\sigma_b^c$ [Па]	$S_c$ [Па]
0,1	4,16E+08	5,06E+07
0,12	4,10E+08	4,95E+07
0,14	4,04E+08	4,83E+07
0,16	3,97E+08	4,70E+07
0,18	3,90E+08	4,58E+07
0,2	3,83E+08	4,45E+07
0,22	3,76E+08	4,32E+07
0,24	3,69E+08	4,18E+07
0,26	3,61E+08	4,04E+07
0,28	3,54E+08	3,90E+07
0,3	3,46E+08	3,76E+07
0,32	3,38E+08	3,61E+07
0,34	3,30E+08	3,45E+07
0,36	3,21E+08	3,30E+07
0,38	3,13E+08	3,14E+07
0,4	3,04E+08	2,97E+07
0,42	2,95E+08	2,80E+07
0,44	2,85E+08	2,63E+07
0,46	2,76E+08	2,45E+07
0,48	2,66E+08	2,27E+07
0,5	2,56E+08	2,09E+07
0,52	2,46E+08	1,90E+07
0,54	2,35E+08	1,70E+07
0,56	2,25E+08	1,50E+07
0,58	2,14E+08	1,30E+07
0,6	2,03E+08	1,09E+07
0,62	1,91E+08	8,81E+06
0,64	1,79E+08	6,64E+06
0,66	1,67E+08	4,42E+06
0,68	1,55E+08	2,16E+06
0,7	1,43E+08	-1,42E+05
0,72	1,30E+08	-2,49E+06
0,74	1,17E+08	-4,88E+06

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ**  
**ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ №23 ПГ ААЭС**

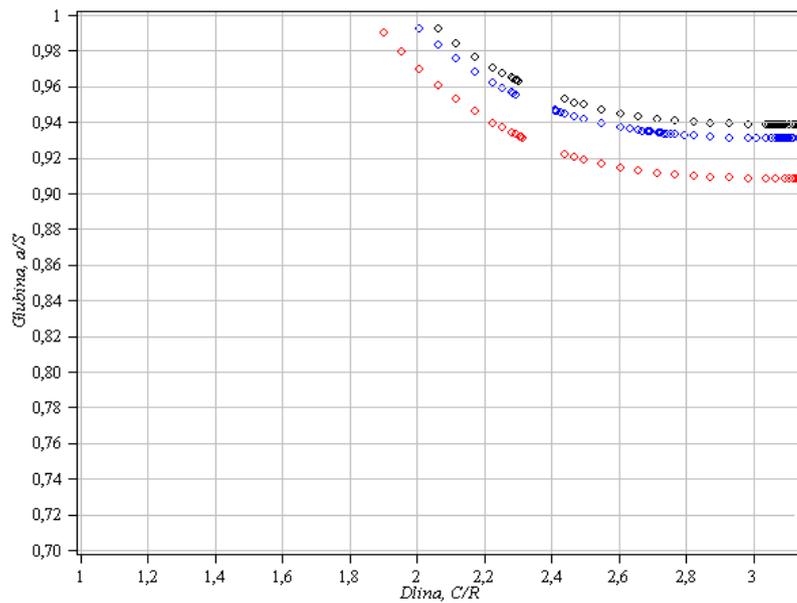
Координаты:

по вертикали –  $a/S$  относительная глубина дефекта;

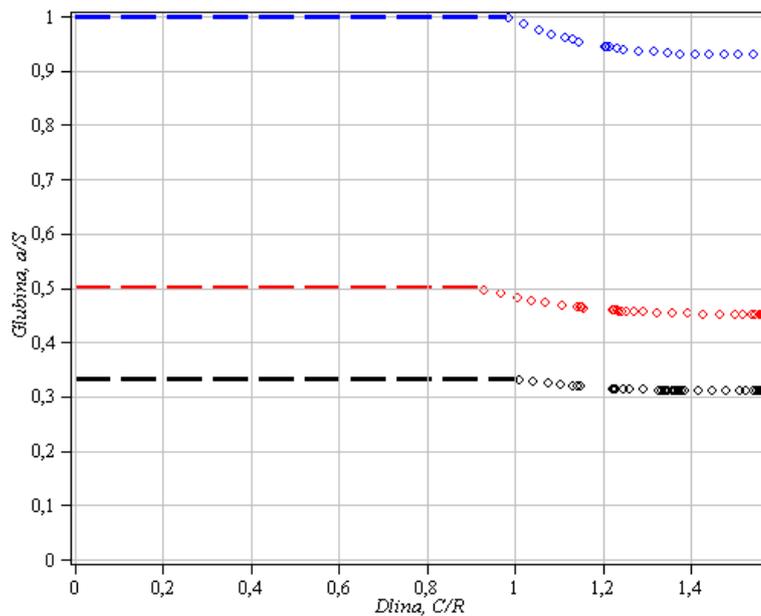
по горизонтали –  $C/R$  протяженность дефекта в радианах.

Рис. П.2.1. Парогенератор ПГВ-4с (№ 1)

а) “Холодный” коллектор

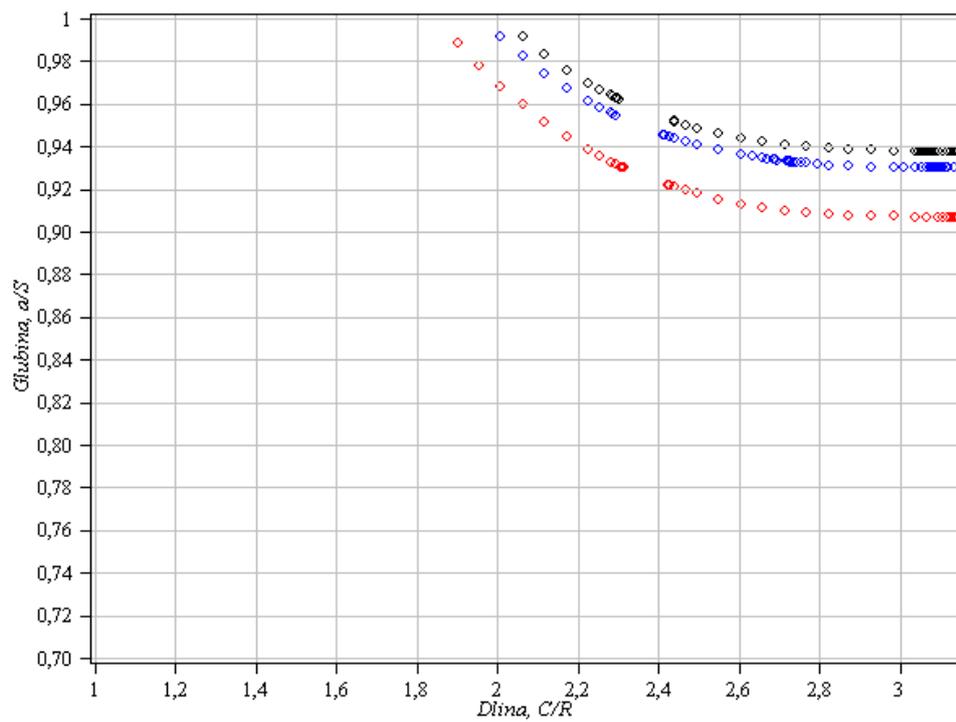


Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.

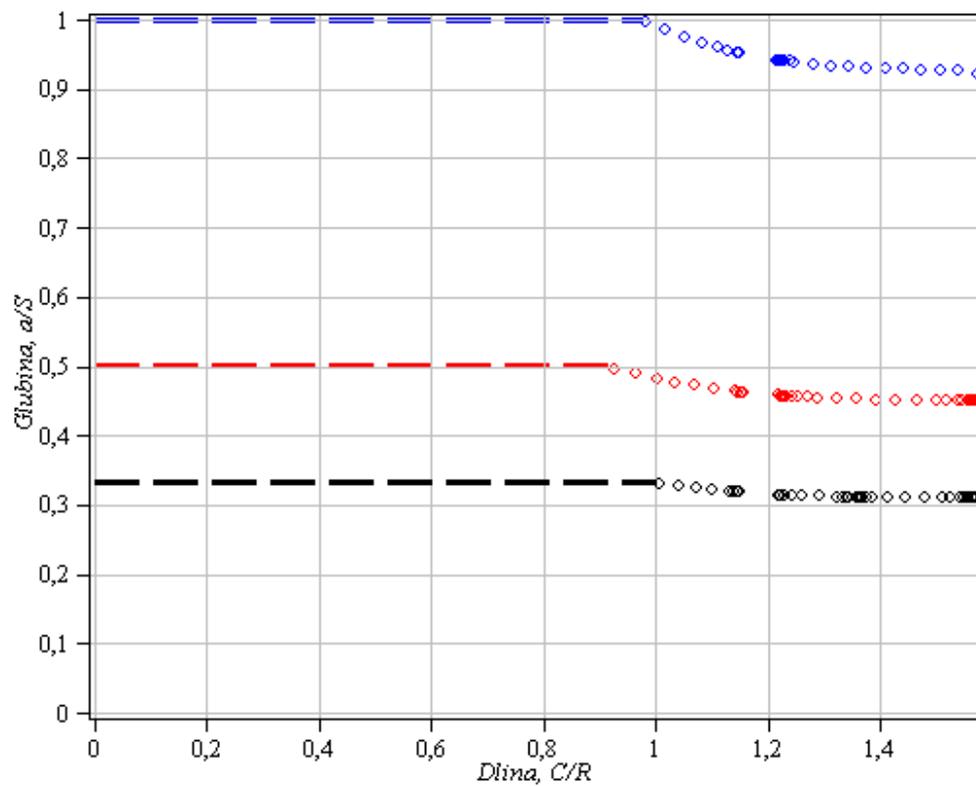


Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.

## б) "Горячий" коллектор



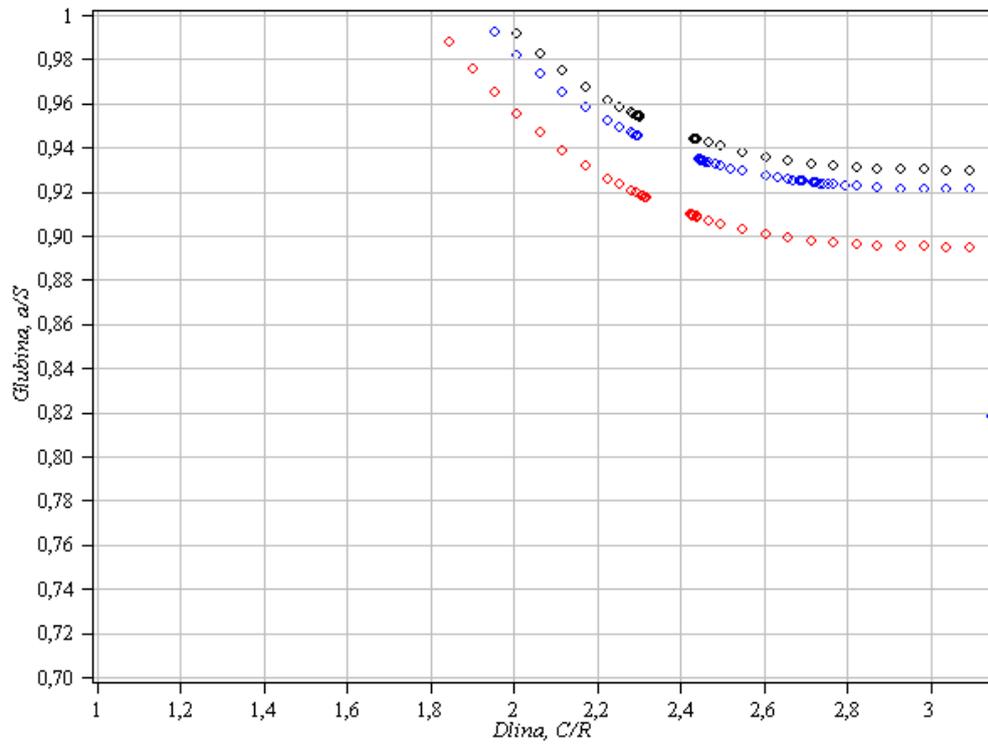
Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.



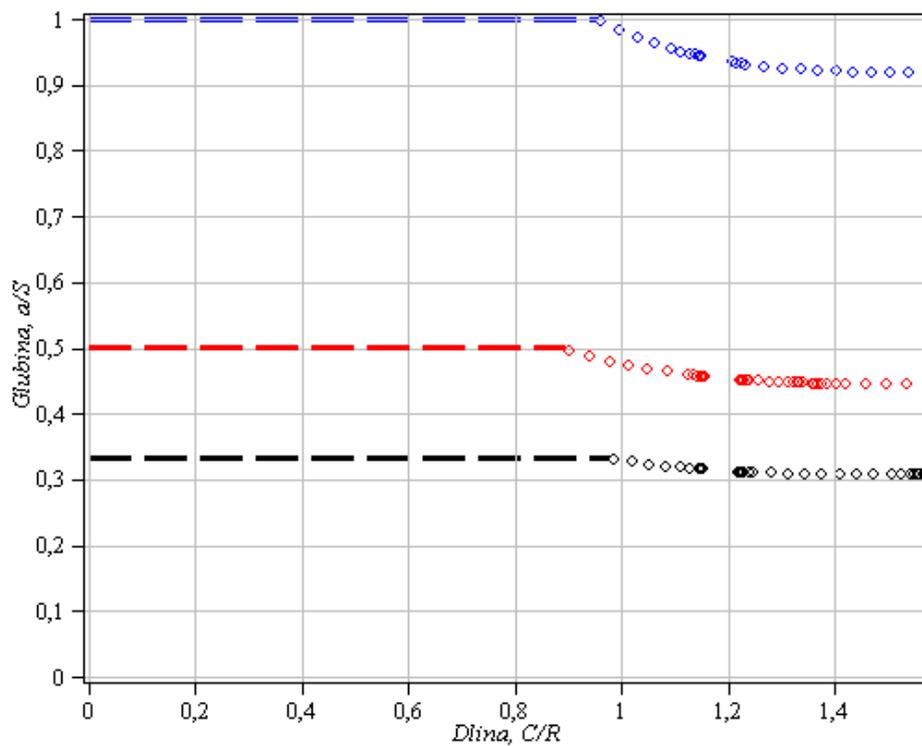
Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.

Рис. П.2.2. Парогенератор ПГВ-4с (№ 2)

“Холодный” и “горячий” коллектора



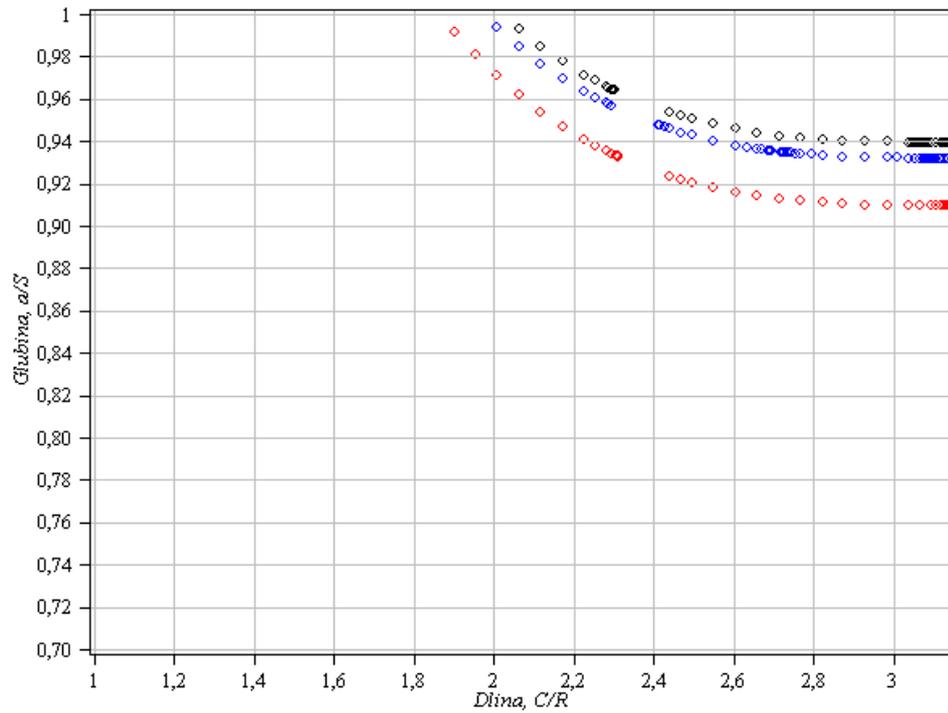
Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.



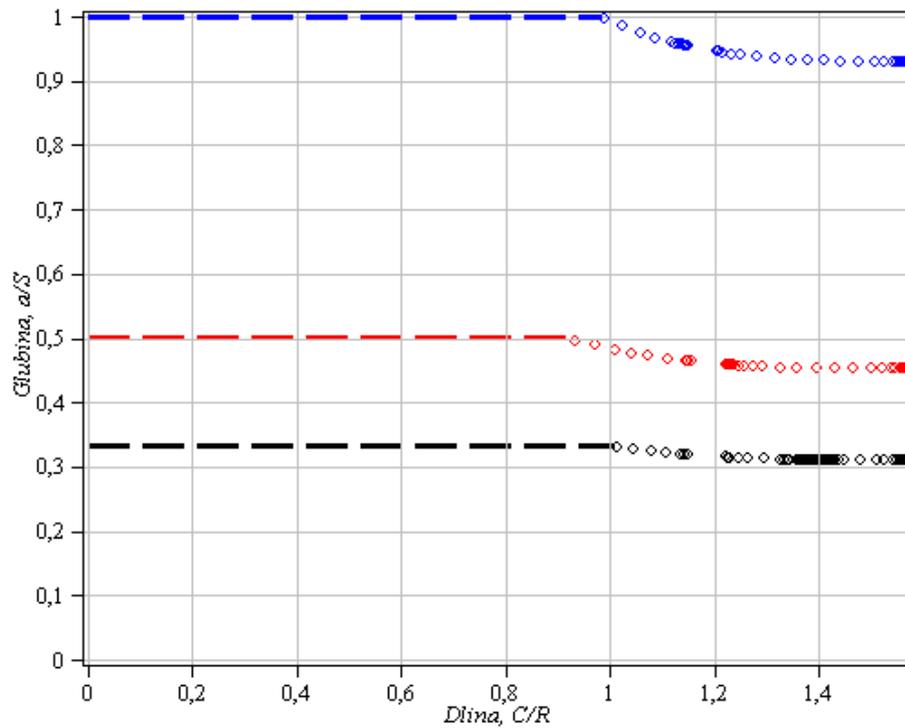
Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.

Рис. П.2.3. Парогенератор ПГВ-4с (№ 3)

а) “Холодный” коллектор

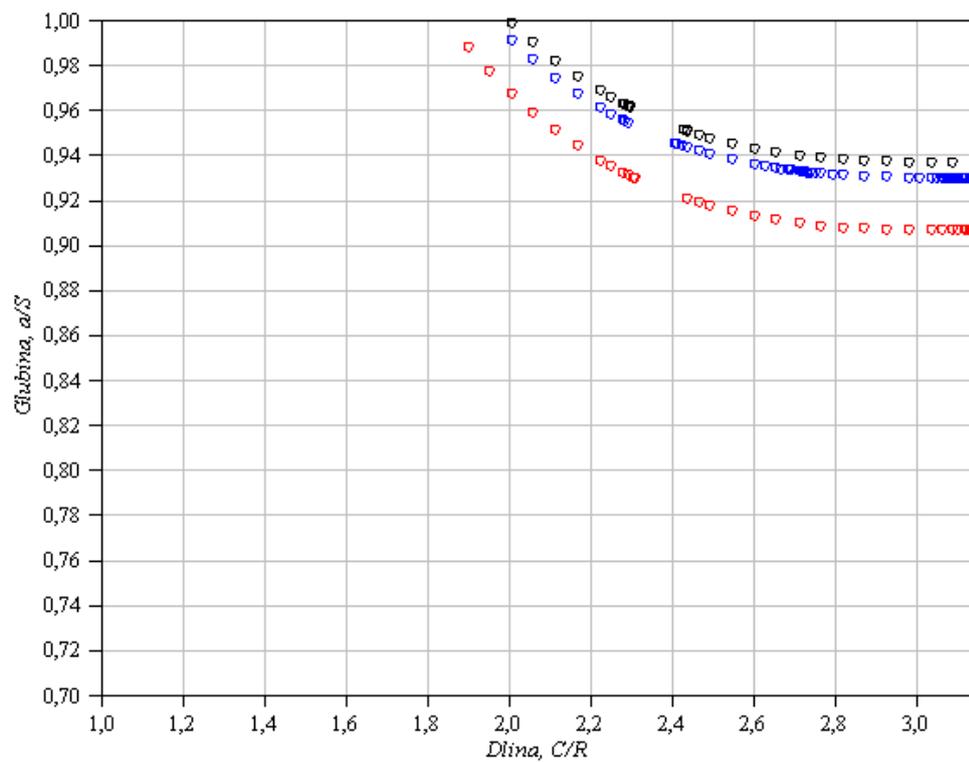


Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

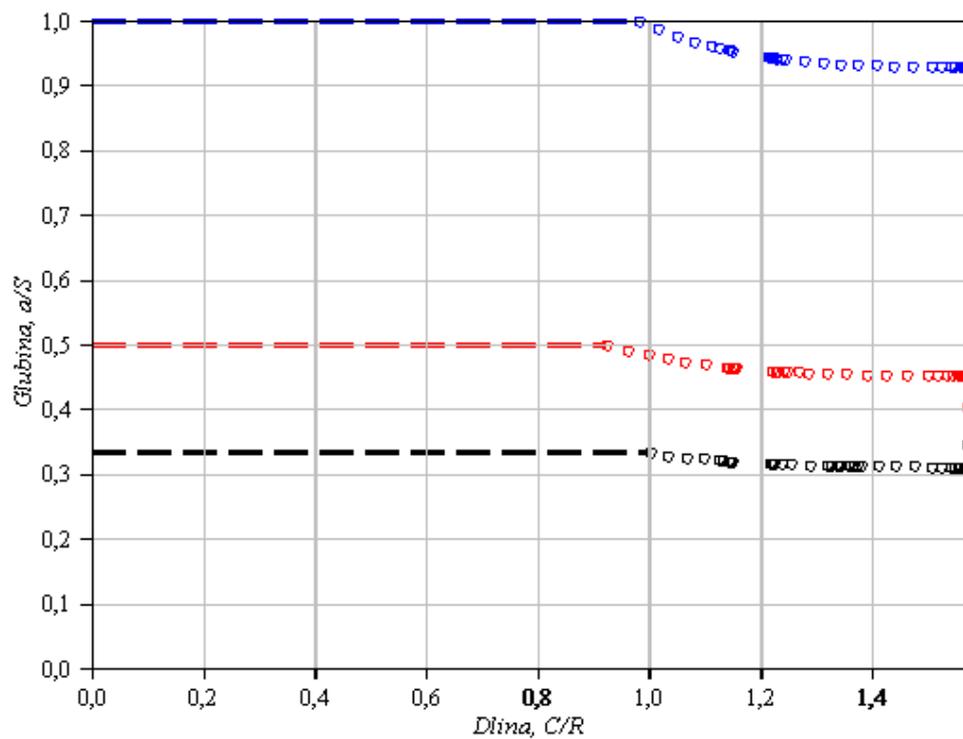


Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

б) “Горячий” коллектор



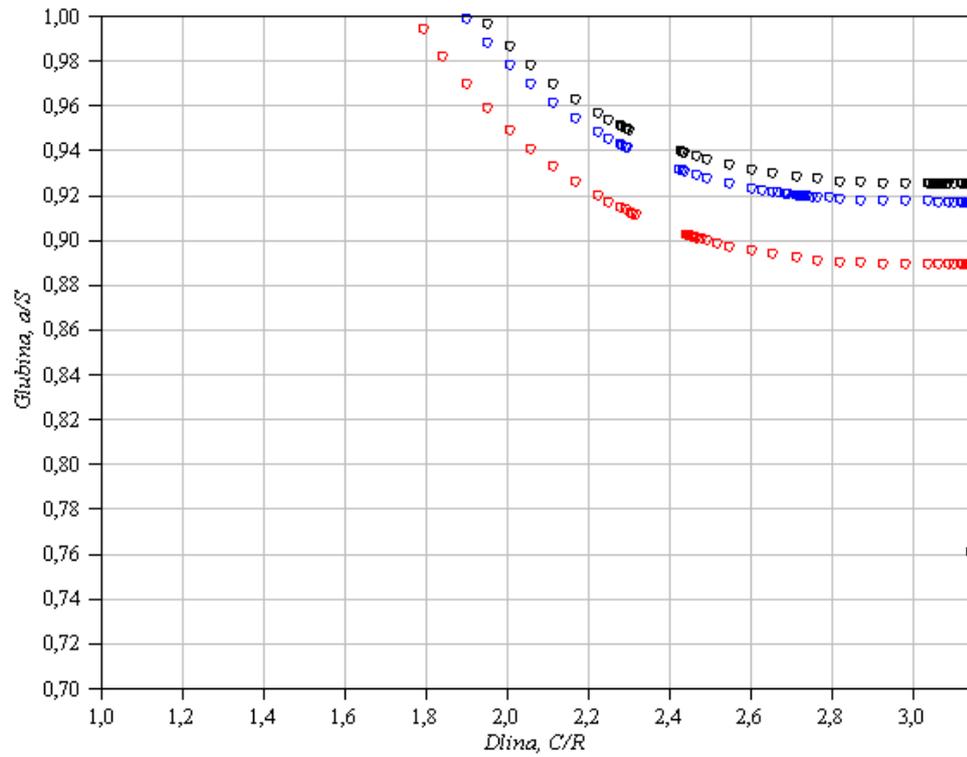
Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.



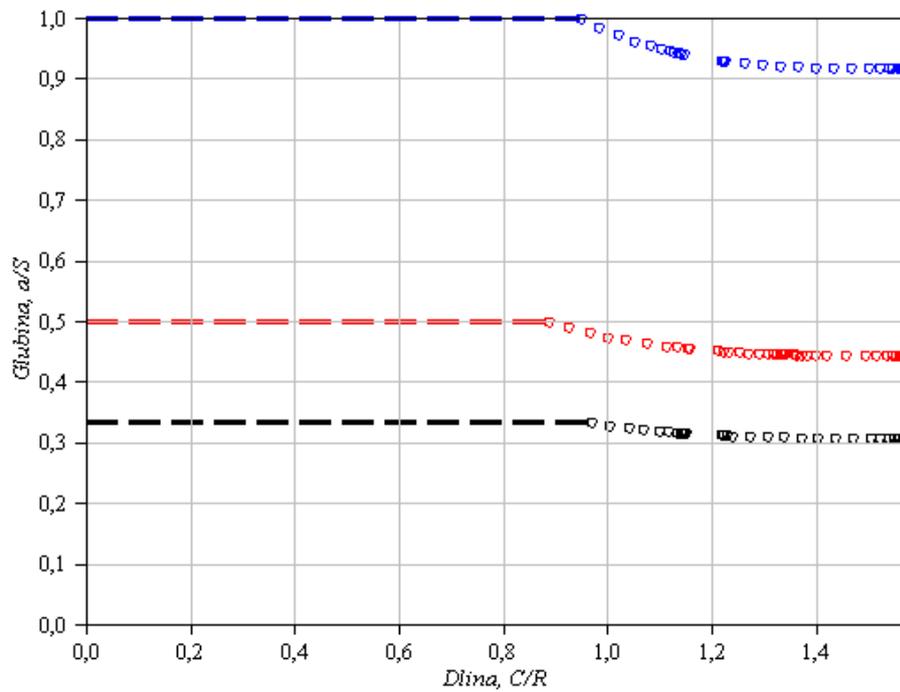
Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

Рис. П.2.4. Парогенератор ПГВ-4с (№ 4)

а) “Холодный” коллектор

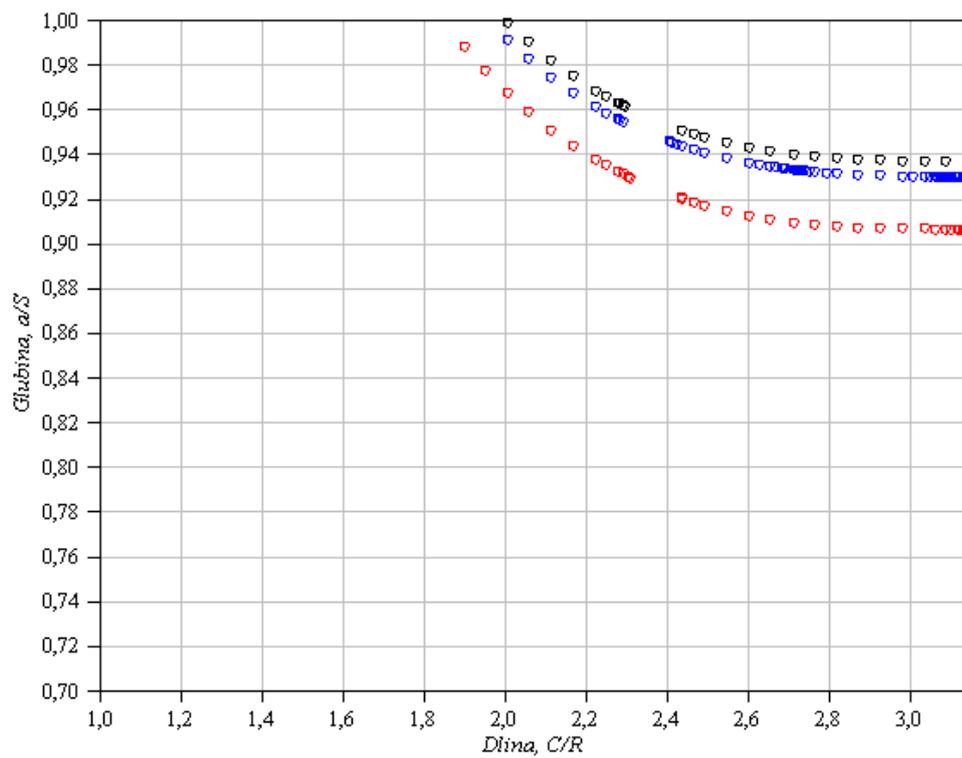


Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.

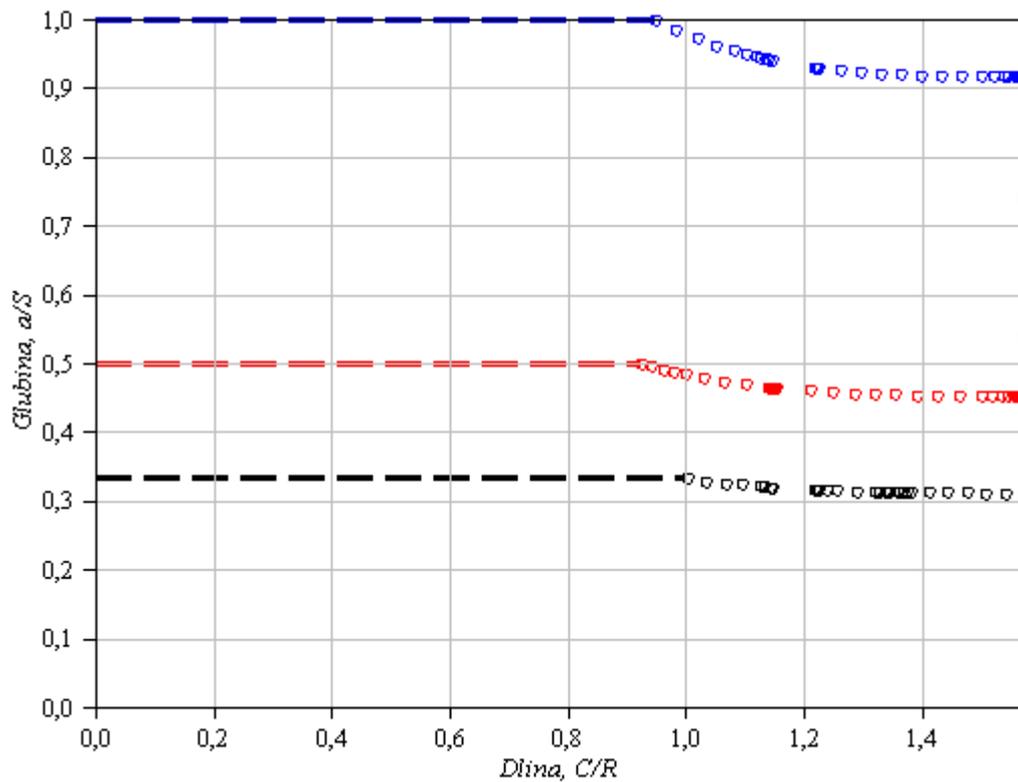


Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.

б) “Горячий” коллектор



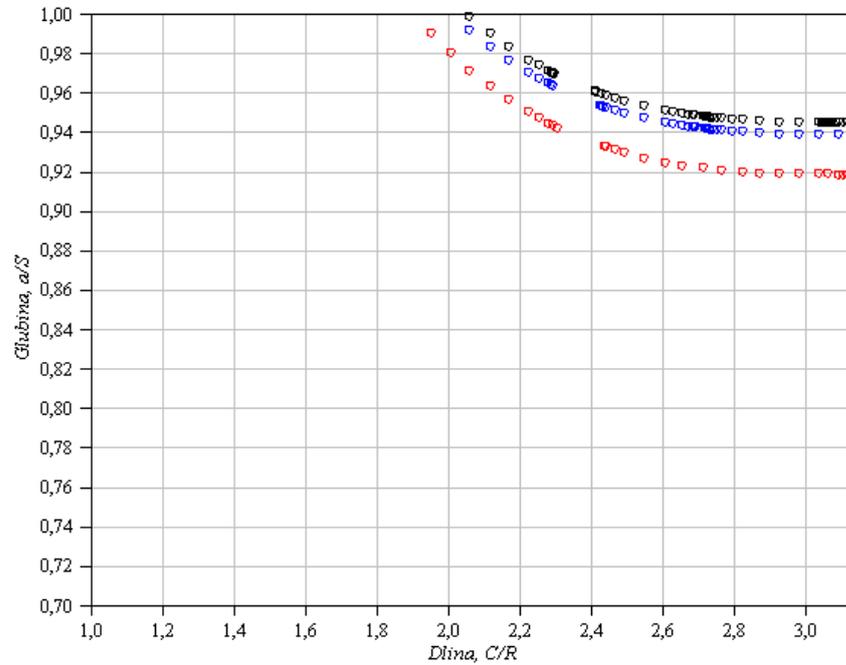
Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.



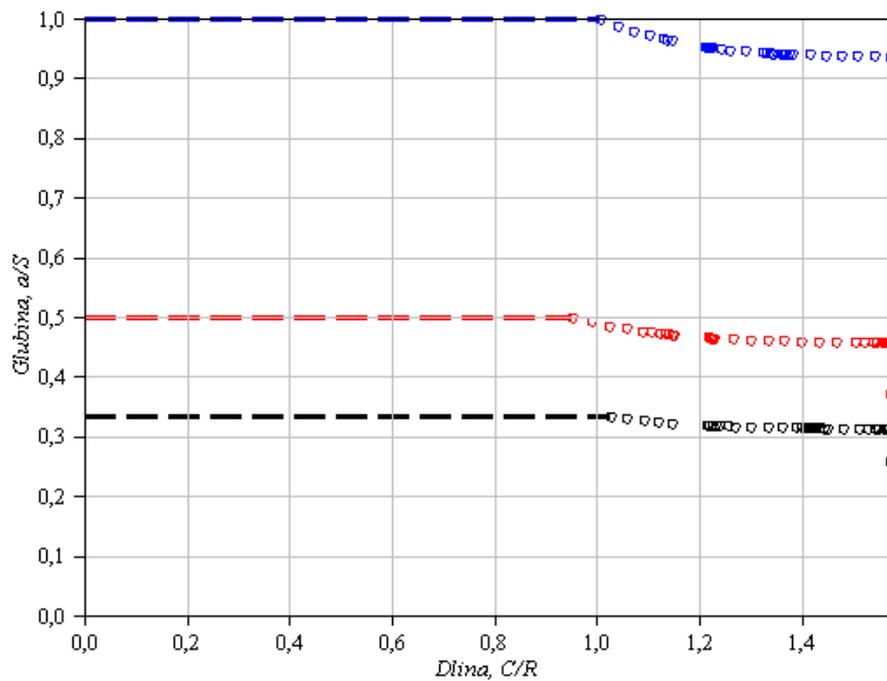
Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+МРЗ; – ГИ.

Рис. П.2.5. Парогенератор ПГВ-4с (№ 5)

“Холодный” и “горячий” коллектора



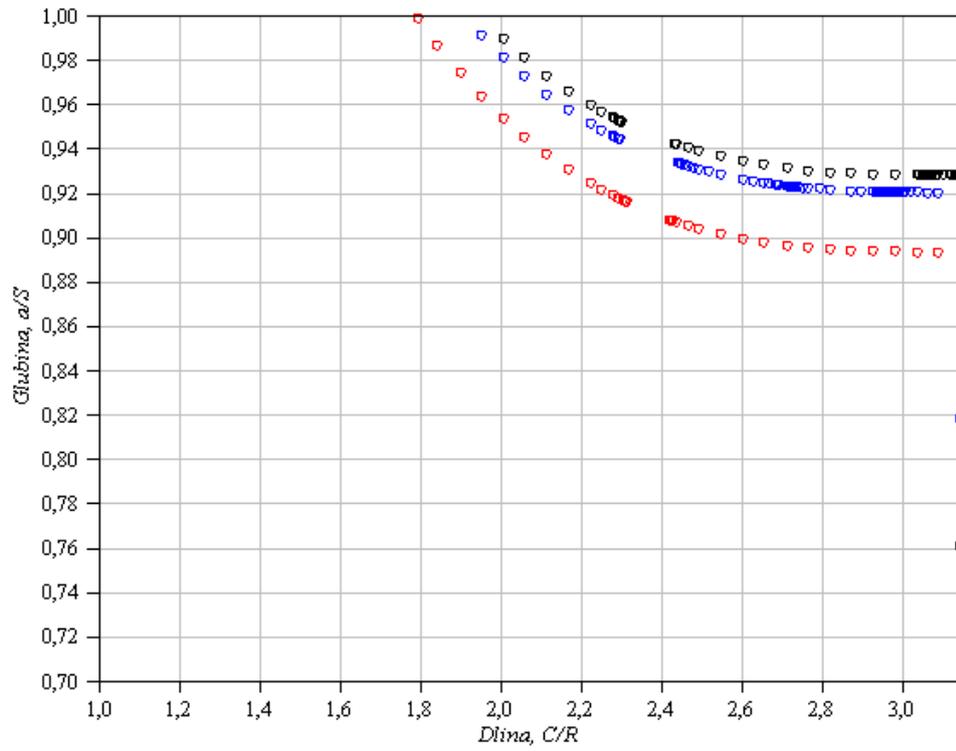
Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.



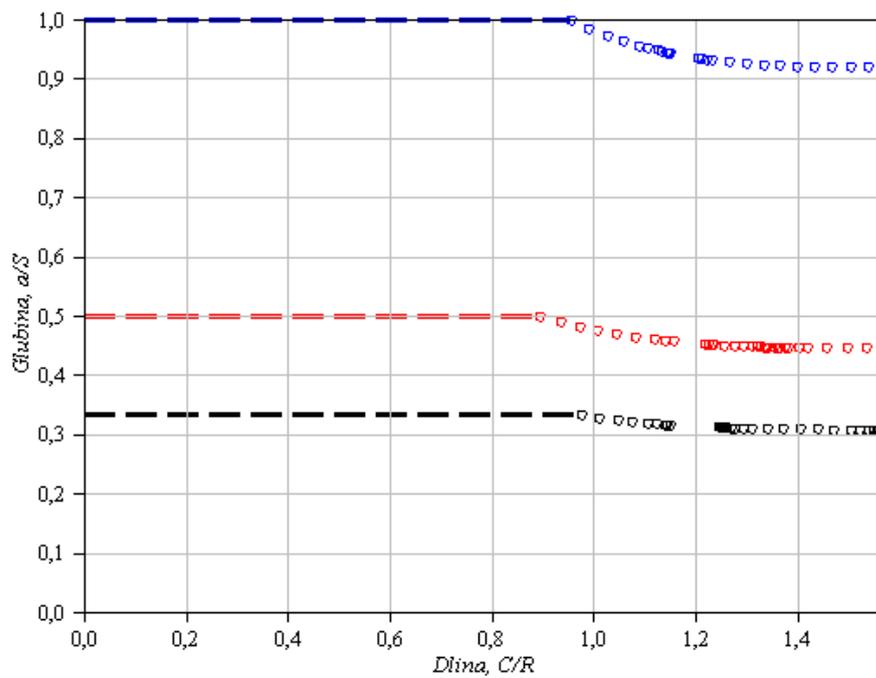
Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – ГИ.

Рис. П.2.6. Парогенератор ПГВ-4с (№ 6)

а) “Холодный” коллектор

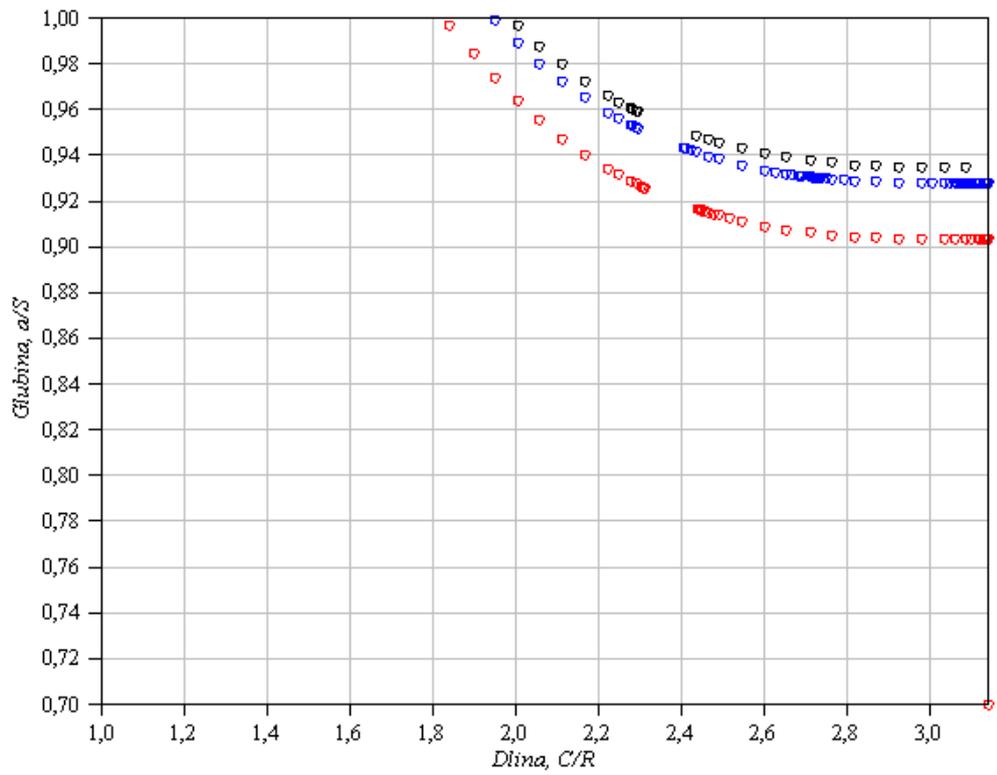


Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

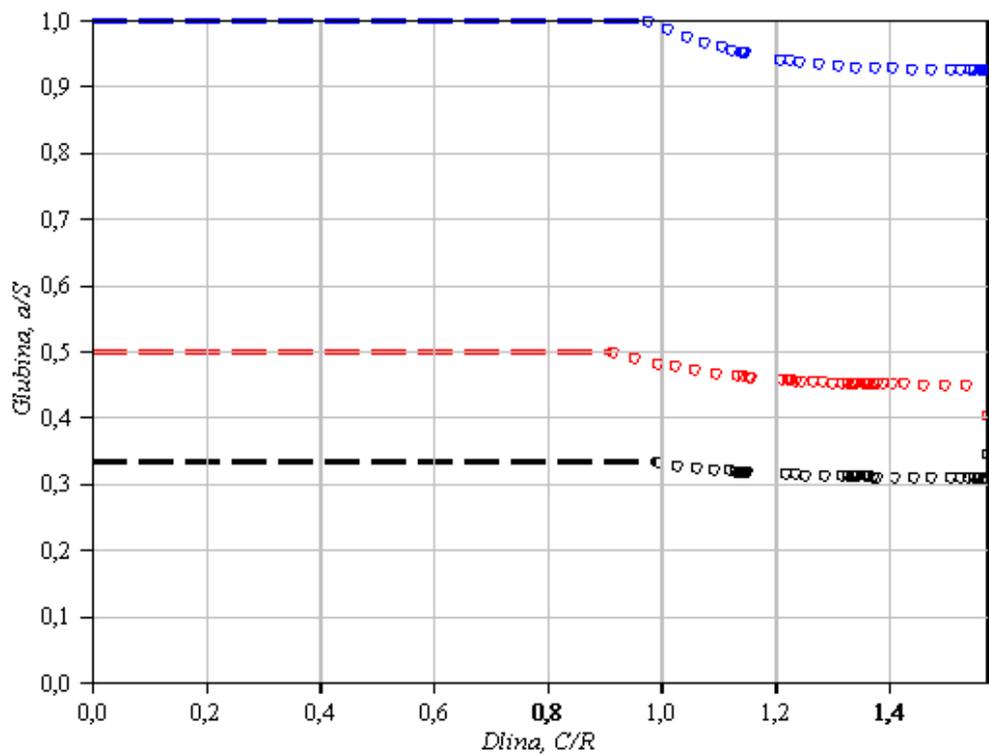


Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

б) "Горячий" коллектор



Критические размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.



Допустимые размеры дефектов в режимах: – НУЭ; – НУЭ+MPЗ; – GI.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**АКТ**  
**О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ**  
**РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**



«Утверждаю»

ЗАО «ААЭК» главный инженер

А.Р. Григорян

05 2017г.

## АКТ

О практическом использовании на Армянской АЭС результатов  
диссертационной работы  
Варданяна Арсена Мовсесовича  
«Оценка влияния условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов  
парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440»

Мы, Заместитель Генерального Директора по продлению эксплуатации Севибян Г.А., Заместитель Главного Инженера по безопасности ААЭС Атоян В.А., Начальник реакторного цеха Арсенян А.С., Начальник службы технического контроля (руководитель лаборатории металлов) Амбарцумян А., настоящим Актом подтверждаем, что методология расчетов критических и предельно допустимых в эксплуатации размеров несплошностей сварных соединений №23 и методика «Норм дефектов сварных соединений №23 патрубков Ду-1100 ПГВ-4с ВВЭР-440», разработанная в диссертационной работе «Оценка влияния условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440» используется в лаборатории металлов Армянской АЭС для обоснования допустимости выявленных индикаций, прогноза их развития и оценки остаточного ресурса узла приварки коллекторов теплоносителя к корпусам парогенераторов, обязательных для принятия решений о дальнейшем обращении с этими сварными соединениями и парогенераторов в целом (продолжение эксплуатации на номинальных параметрах, сокращение периодичности контроля и/или срока ремонта).

ЗГД по продлению

Севибян Г.А.

ЗГИ по безопасности ААЭС

Атоян В.А.

Начальник реакторного цеха

Арсенян А.С.

Начальник СТКиДМ

Амбарцумян А.В.