



## РАЗРАБОТКА МЕТОДИК УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРА К ПАРОГЕНЕРАТОРУ ПГВ-1000М

**А. В. ДУБ, В. А. ДУРЫНИН, А. Н. РАЗЫГРАЕВ, Н. П. РАЗЫГРАЕВ, И. Л. ХАРИНА**  
НПО ЦНИИТМАШ. 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4. E-mail: eniitmash@cniitmash.ru  
**Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. МАХНЕНКО, О. В. МАХНЕНКО, Г. Ю. САПРЫКИНА**  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одна из основных проблем безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М – коррозионное повреждение узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200. В статье рассмотрены методики ультразвукового контроля этого узла и оценки допустимости выявленных дефектов несплошности. Разработанные методики прошли апробации на ряде АЭС России и Украины. Применение методик позволит оперативно оценить степень опасности обнаруженных дефектов и снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов. Библиогр. 22, табл. 3, рис. 21.

*Ключевые слова:* ультразвуковой контроль, ПГВ-1000М, узел соединения коллектора с патрубком, коррозионное растрескивание под напряжением, ультразвуковой контроль, прогнозирование, напряженно-деформированное состояние, полуэллиптическая трещина, схематизация несплошностей, диаграмма статической коррозионной трещиностойкости материала

В настоящее время одной из основных проблем безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М реакторных установок ВВЭР-1000 является повреждение (коррозионное разрушение) в узле сварного соединения №111 коллектора к патрубку Ду 1200. Начиная с 1998 г. на различных АЭС России и Украины были выявлены дефекты несплошности в зоне сварного соединения № 111.

Учитывая актуальность проблемы повреждения узла сварного соединения № 111 коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М для АЭС Украины, регулярная диагностика этого узла современными методами ультразвукового контроля (УЗК) и оперативная оценка степени опасности обнаруженных дефектов на текущий момент и на момент следующего планового контроля, несомненно, позволит существенно снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов при обеспечении необходимой безопасности эксплуатации.

В статье представлены результаты работ по разработке эффективных методов УЗК узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М и соответствующих подходов оценки допустимости выявленных несплошностей.

**Методика УЗК узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М.** В 1998 г. на 5-м блоке Нововоронежской АЭС во время осмотра парогенератора ПГВ-1000М (рис. 1) при подготовке блока к пуску была обнаружена утечка пара. Было установлено, что

узел соединения горячего коллектора с парогенератором содержит трещину, распространяющуюся вдоль сварного соединения. Трещина длиной ~ 310 мм начиналась на поверхности галтельного перехода радиусом 20 мм кармана, т. е. в основном металле на внутренней поверхности парогенератора (2-й контур) и росла в сторону наружной поверхности сначала по основному металлу, а затем по сварному шву № 111/1, и выходила на наружную поверхность в трех точках в виде несплошностей длиной 3...7 мм.

В связи с обнаружением трещины потребовалось разработать методику УЗК узла соединения коллектора с патрубком (УСКП) (рис. 1, б).

Патрубок Ду 1200 парогенератора и коллектор изготавливают из стали 10ГН2МФА (перлитного класса). Сварное соединение № 111 может быть симметричным и несимметричным. Сварные швы выполняют ручной или автоматической сваркой. Перед сваркой узла на кромки сварного соединения наносят низкоуглеродистую наплавку. Имеются парогенераторы, в которых сварное соединение № 111 низкоуглеродистых наплавки не имеет. Корень сварного шва выполняют вручную аргодуговой сваркой с присадочной проволокой 08Г2С. Высота корневого слоя 6...8 мм. Заполнение основной части шва выполняют при ручной сварке электродами ЦУ-7 или УОНИ-13/55 диаметром 4 или 5 мм, а при автоматической сварке используют проволоку Св-08ГСМТ и Св-10ГН1МА диаметром 2 мм и флюс ФЦ-16 или АН-17.

© А. В. Дуб, В. А. Дурынин, А. Н. Разыграев, Н. П. Разыграев, И. Л. Харина, Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, 2014

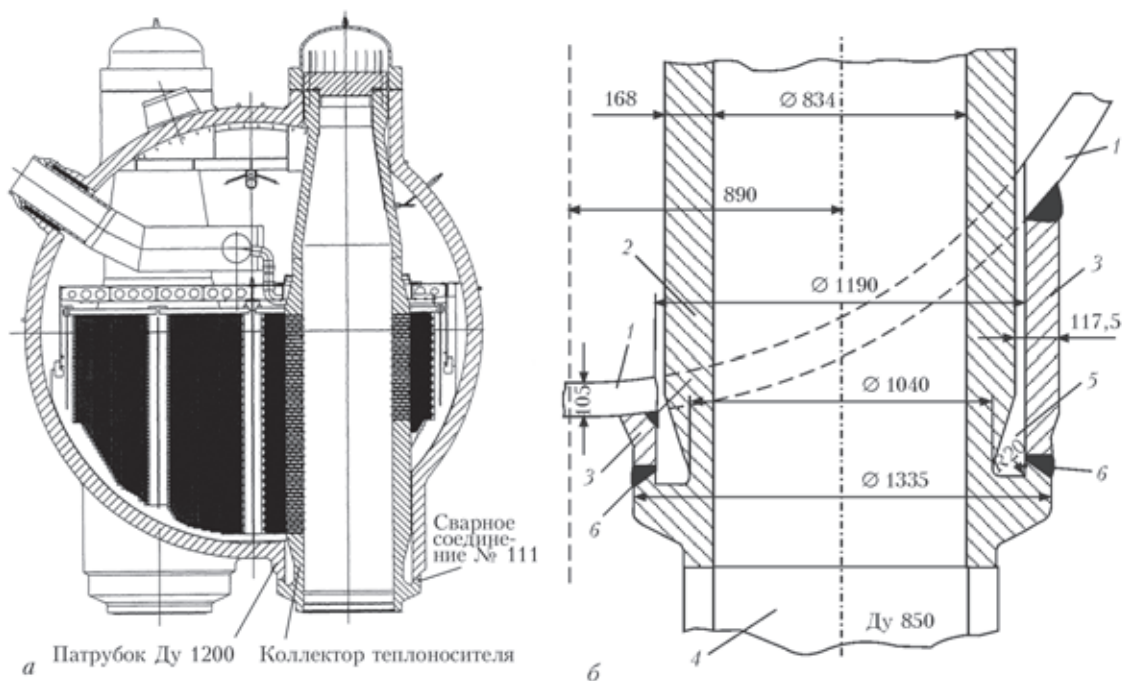


Рис. 1. Конструкция парогенератора и узла соединения коллектора с парогенератором: а – фрагмент чертежа ПГВ-1000М; б – схема расположения сварного соединения № 111: 1 – корпус ПГ; 2 – коллектор; 3 – патрубок диаметром 1200; 4 – трубопровод Ду 850; 5 – карман; 6 – сварной шов № 111

Изготовление парогенераторов и сварных соединений выполняли в соответствии с требованиями и правилами [1 – 4].

Пространство между патрубком Ду 1200 (со стороны корня сварного шва) и корпусом коллектора носит название «карман». Карман расположен во втором контуре реакторной установки ВВЭР-1000. С другой стороны от патрубка по отношению к сварному шву узел включает коллектор со скосом 25 или 30°. На скос выходят два патрубка продувки Ду 20, расположенные через 180°. Скос выходит на патрубок коллектора Ду 850 (с антикоррозионной наплавкой), к которому приваривается трубопровод главного циркуляционного контура (ГЦК) Ду 850 (первый контур).

Для обеспечения контроля металла УСКП Ду 1200 парогенератора специалистами ЦНИИТМАШ разработана специальная «Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000» МЦУ-11-98п. Методика использует следующие операции УЗК, установленные [5]: прозвучивание прямым преобразователем продольными волнами, прозвучивание наклонными преобразователями поперечными волнами с углами ввода 45° (-5°) и 60° (+5°) на продольные и поперечные несплошности и дополнительные операции для обеспечения прозвучивания корня сварного соединения, металла у наружной и донной поверхностей и выявления трещиноподобных дефектов по всему контролируемому объему (прозвучивание головными волнами, распространяющимися вдоль поверхности и под углом (1...15°) к ней, прозвучивание мето-

дом «корневой тандем», прозвучивание наклонным преобразователем продольными волнами с углом ввода 25 или 30° в зависимости от угла скола коллектора).

При УЗК с помощью операций, установленных [5], чувствительность контроля и оценки качества выбирают в полном соответствии с требованиями и рекомендациями [2, 4].

Что касается определения чувствительности УЗК на поперечные несплошности, то Пункт 5.3 [5] устанавливает, что «несплошность считают поперечным дефектом (типа «Т» по [6]), если при прозвучивании в направлении продольной оси шва ее эквивалентная площадь  $S_{\text{поп}}$ , независимо от условной протяженности, равна 50 % или более величины наименьшей фиксируемой эквивалентной площади, а при расположении преобразователя под углом  $90 \pm 15^\circ$  к продольной оси шва, его эквивалентная площадь менее 50 %  $S_{\text{поп}}$ », т.е. для УСКП (и сварного соединения № 111)  $S_{\text{поп}} = 1,75 \text{ мм}^2$ .

При определении уровней чувствительности УЗК с помощью дополнительных операций руководствовались следующими соображениями. При контроле головными волнами чувствительность контроля установлена в соответствии с требованиями [7] Приложение 5 «Методика контроля подповерхностной части сварных соединений головными волнами». Браковочный уровень чувствительности устанавливается по амплитуде эхо-сигнала от плоскодонного отверстия диаметром 4 мм, расположенного в подповерхностном слое.



Для операции контроля методом «корневой тандем» из [8] в Приложении 14 рекомендуется устанавливать браковочный уровень чувствительности по амплитуде эхо-сигнала от плоскодонного отверстия диаметром 6 мм, что аналогично требованиям Правил контроля (ПК) в процессе эксплуатации КТА [9] (Германия) для контроля методом «корневой тандем» на вертикальные трещины.

Со времени разработки и начала периодического использования в плановые ремонты блоков АЭС методики МЦУ-11-98п в 2000 г. на Нововоронежской, Южно-Украинской, Балаковской, Калининской и Запорожской АЭС при УЗК были выявлены двадцать одна дефектная зона в пятнадцати парогенераторах (10 – горячие и 5 – холодные). На рис. 2 и 3 представлены некоторые данные по анализу повреждений и ремонтов. В настоящее время в России и Украине эксплуатируются девяносто два парогенератора ПГВ-1000М. При этом на некоторых узлах трещины были выявлены в нескольких зонах. Динамика роста общего количества ремонтов ПГ-1000М за период 1998 – 2013 гг. представлена на рис. 2. Как видим, имеет место постоянный, за исключением 2002, 2005 и 2008 годов, рост количества ремонтов. С 1998 по 2004 г. повреждения были выявлены на горячих коллекторах, затем, в 2011–2013 гг. были обнаружены несколько трещин на холодных коллекторах. В связи с этим на начальном этапе при анализе повреждаемости делался существенный акцент на температуру теплоносителя.

На рис. 3 представлено распределение количества поврежденных ПГВ-1000М по ориентации трещин относительно оси сварного шва. Направление трещин и зоны их расположения являются индикатором направления действия максимальных напряжений в узле. Продольные трещины распространяются вдоль оси сварного шва и на-

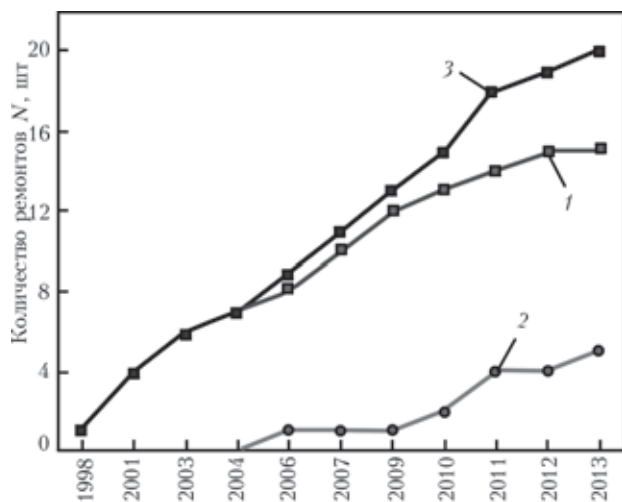


Рис. 2. Динамика общего количества ремонтов ПГВ-1000М за 1998–2013 гг.: 1 – горячие; 2 – холодные; 3 – суммарное количество

пряжения, способствующие их образованию и развитию, действуют в направлении, перпендикулярном оси шва. Поперечные трещины распространяются перпендикулярно оси сварного шва и напряжения, способствующие их образованию и развитию, действуют в направлении вдоль оси шва – кольцевые напряжения.

На рис. 4 представлена сводная дефектограмма расположения мест повреждений (трещин) в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М.

Анализ расположения выявленных при УЗК и подтвержденных при вскрытии или выемке повреждений (трещин) показал, повреждения связаны с коррозионным растрескиванием под напряжением по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания (ЗДКР) и что зона инициирования и развития трещин расположена:

- вблизи начала галтели R20 кармана коллектора и перехода ее в цилиндр патрубка Ду 1200;
- под парогенератором на участке ближе к продольной оси парогенератора, где патрубок Ду 1200 имеет минимальную высоту;
- на участке с максимальной высотой патрубка Ду 1200 (на максимальном удалении от оси парогенератора) в зоне пересечения оси сварного шва и оси трубопровода ГЦК Ду 850.

Из представленных данных следует, что повреждения в УСКП являются системной проблемой и образуются в результате воздействия ряда факторов: проектных, конструкторских, технологических, монтажных и эксплуатационных.

Выделим особые случаи контроля и ремонта УСКП.

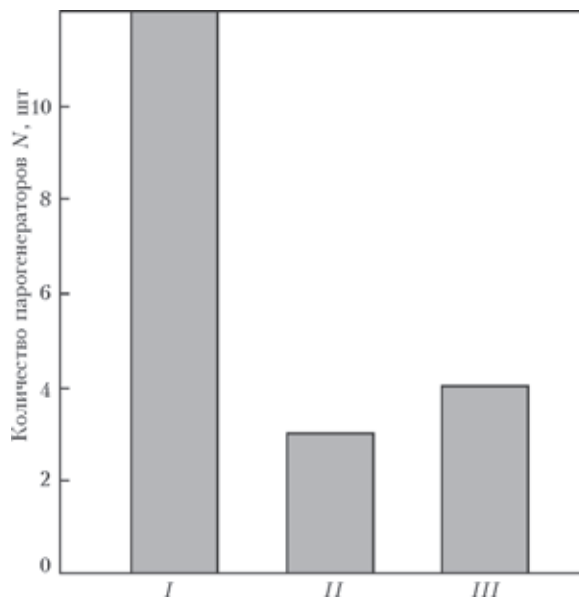


Рис. 3. Распределение количества поврежденных ПГВ-1000М по ориентации трещин относительно оси сварного шва за период 1998–2013 гг.: I – продольные, II – поперечные, III – продольно-поперечные



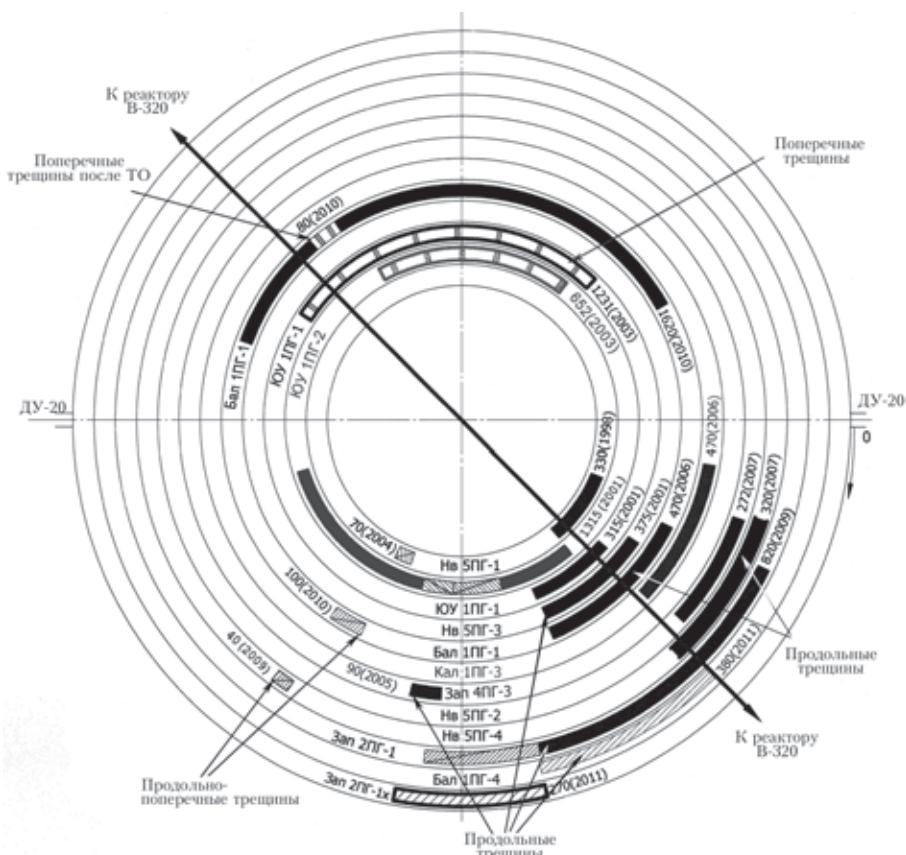


Рис. 4. Сводная дефектограмма УЗК узлов приварки коллектора к патрубку Ду 1200 за 1998–2011 гг.: 1ПГ1 – блок № 1, парогенератор № 1; Нв – Нововоронежская; Бал – Балаковская; Кал – Калининская; ЮУ – Южно-Украинская; Зап – Запорожская АЭС; 470 – длина зоны повреждения в мм (цифра в скобках – год обнаружения)

**Нововоронежская АЭС.** В 2004 г. в узле приварки горячего коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М была впервые выявлена дефектная зона в виде продольно-поперечной несплошности с параметрами, превышающими браковочные характеристики по [4] и МЦУ-11-98п. Дефектограмма УЗК представлена на рис. 5. В этом случае были определены необходимость увеличения объемов прозвучивания и целесообразность корректировки методики МЦУ-11-98п для обеспечения высокого качества УЗК по МЦУ-11-98п при обнаружении продольно-поперечных несплошностей.

**Балаковская АЭС.** В 2010 г. на 1ПГ-1 проведены сложные и объемные ремонтные работы узла приварки горячего коллектора. В 2006 г. этот узел уже подвергался ремонту на участке длиной ~ 500 мм. На первом этапе была выявлена продольно-поперечная трещина длиной ~ 100 мм и максимальной высотой 42 мм (рис. 6). После ремонта данного участка на этапе сдаточного УЗК после термической обработки, высокого отпуска, с противоположной стороны узла коллектора были выявлены поперечные несплошности на участке длиной ~ 90 мм. По результатам выемки и исследования дефектного металла было установлено наличие на галтельном переходе множества поперечных трещин высотой 1...8 мм. Две самые

большие трещины имели высоту 25 и 18 мм. УЗК показал наличие аналогичных поперечных несплошностей различной высоты на участке длиной ~ 1680 мм. Выемка и исследование поврежденного металла подтвердили результаты ручного УЗК – наличие поперечных трещин ЗДКР. Участок узла почти в половину длины его окружности (~ 1050 мм) был впервые отремонтирован по специальной технологии. По техническому решению парогенератор допущен к эксплуатации. На парогенераторах ПГВ-1000М за одну ремонтную кампанию были выбраны и отремонтированы два участка на одном узле. Впервые на АЭС России в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М были выявлены поперечные трещины. Ранее похожие трещины, но значительно большей высоты, были выявлены и отремонтированы на ПГ-1 и 2 блока 1 Южно-Украинской АЭС.

Визуальные, металлографические, фратографические и спектральные исследования поврежденного металла из парогенераторов, выполненные в ЦНИИТМАШ, позволили определить природу повреждения: коррозионное растрескивание под напряжением по механизму ЗДКР.

Сопоставление результатов исследований характера повреждения металла узлов приварки горячих коллекторов к патрубкам Ду 1200 на АЭС Украины и России позволило выявить следующие

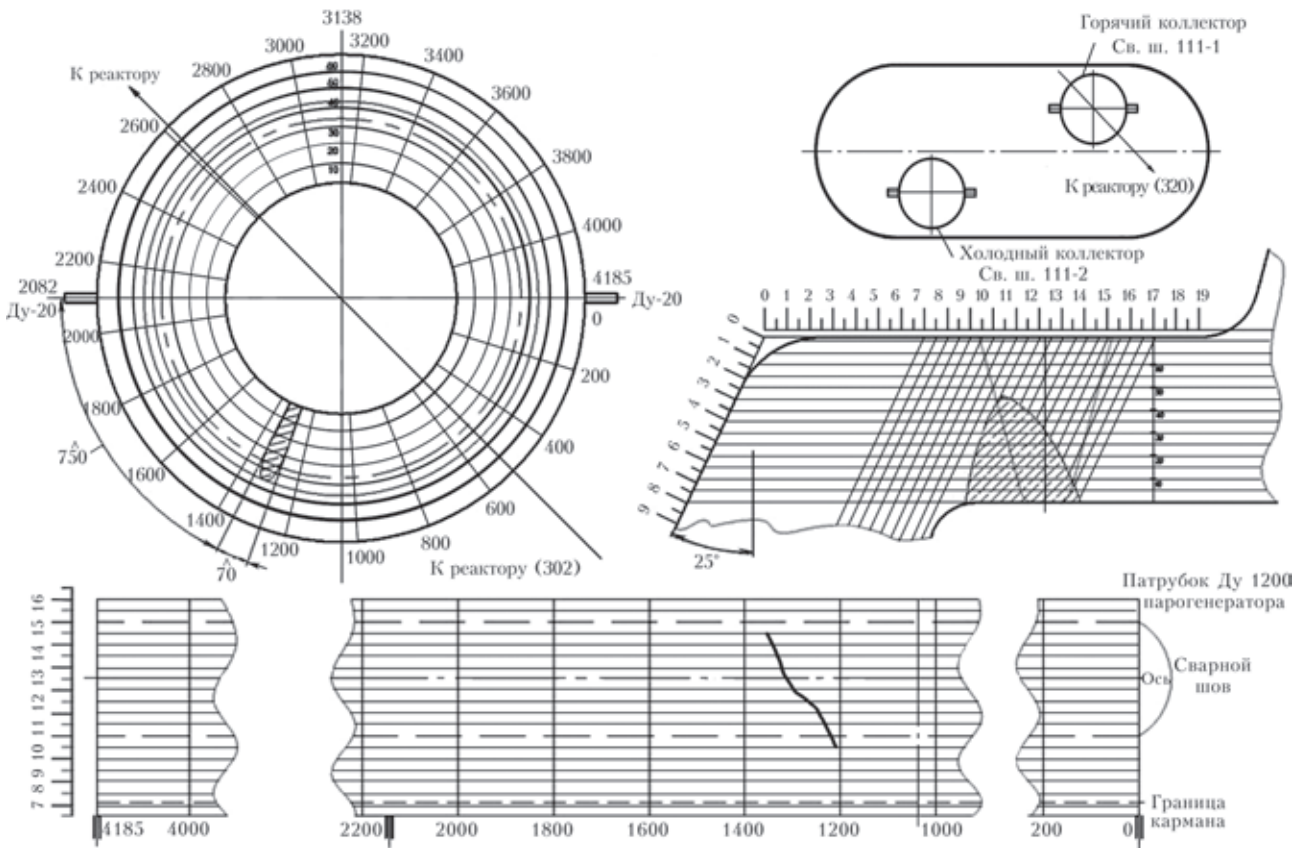


Рис. 5. Дефектограмма УЗК узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М Нововоронежской АЭС (2004 г.)

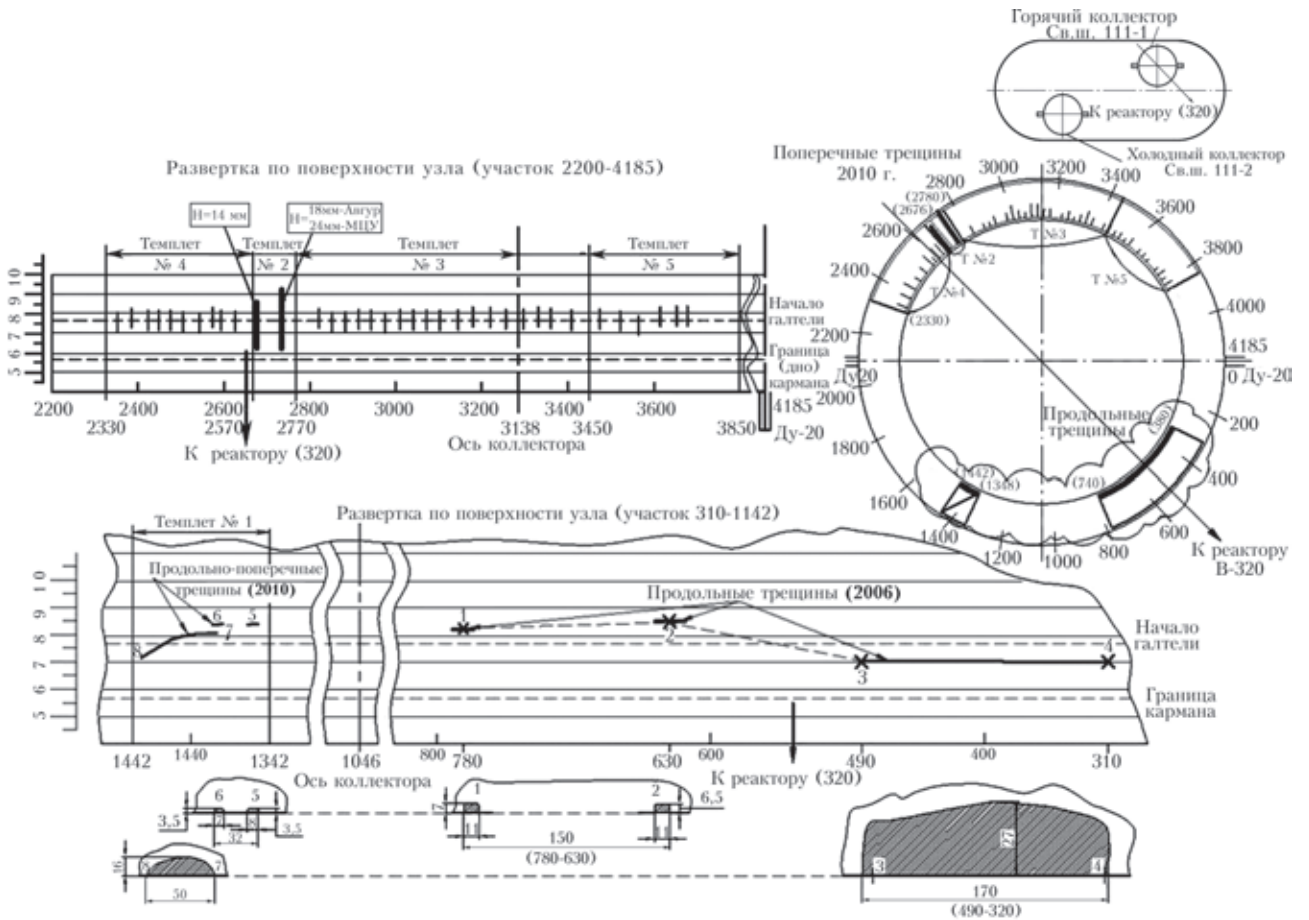


Рис. 6. Дефектограмма УЗК узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М Балаковской АЭС в 2006 и 2010 гг.



основные общие признаки разрушения и условий его возникновения:

- место зарождения и развития повреждений. Зона радиусного перехода R20 и цилиндрической поверхности – «карман» коллектора;
- коррозионная природа разрушения. Начинается на внутренней поверхности, контактирующей со средой «кармана» коллектора;
- многоочаговый характер инициирования повреждений. Одинаковые для всех случаев коррозионные трещины, развивающиеся к наружной поверхности «кармана» и в окружном направлении;
- коррозионные трещины имеют множественные разветвления – сателлиты. При многоочаговом характере зарождения весьма хаотическое распространение, волосовидные окончания, поражающие большие объемы металла.

Во всех случаях внутренняя поверхность анклава «кармана» была покрыта плотным слоем продуктов коррозии и отложений со следами поражения язвенной коррозией и растрескивания. Практически полная идентичность результатов металлографического исследования характера трещин, инициирующихся в большинстве случаев от окисных очагов питтинговой коррозии. Устье и берега трещин окислены, просматривается периодичность подрастания трещин, бездеформационный характер разрушения, наличие инкубационного периода до инициирования трещин, что свойственно процессам коррозионного растрескивания.

**Калининская АЭС.** В 2006 г. на холодном коллекторе 1ПГ-3 были выявлены повреждения узла приварки коллектора к парогенератору. Они располагались также в районе галтели R20 вблизи патрубка Ду 20.

По результатам УЗК была размечена дефектная область, произведена вырезка металла и выемка темплета. Визуальный осмотр поверхностей темплета показал:

- на участке перехода от цилиндрической части кармана к R20, где имеет место технологиче-

ская риска, отчетливо прослеживается интенсивное коррозионное повреждение (рис. 7);

- на нижней поверхности (со стороны скоса 60 °) в основном металле присутствуют протяженные повреждения металла (рис. 8);

– на поверхности кармана по всей длине галтели R20 присутствуют коррозионные поражения глубиной не менее 5 мм, которые распространяются в сторону наружной поверхности и выходят на нижнюю (боковую) поверхность темплета, с торцевой стороны она выглядит как коррозионная язва (рис. 9);

- на поверхности кармана в зоне галтели R20 имеют место прерывающиеся очаги коррозии, имеющие продольную ориентацию;

– на цилиндрическом участке наблюдается множество очагов язвенной коррозии округлой формы, а на галтели R20 очаг язвенной коррозии с преимущественно продольным плоскостным развитием.

Результаты визуального, макро- и микроанализов позволили констатировать:

- наблюдаемое повреждение носит характер многоочаговых коррозионных поражений, инициируемых на внутренней поверхности металла кармана поверхности и может квалифицироваться

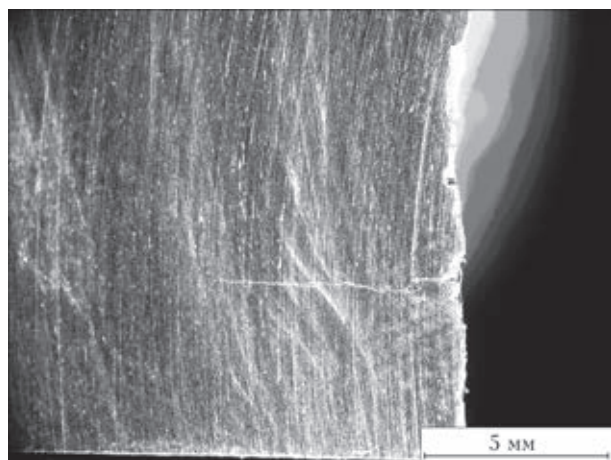


Рис. 7. Характерная трещина ЗДКР (выявлена по результатам УЗК) после разрезки темплета (Балаковская АЭС)

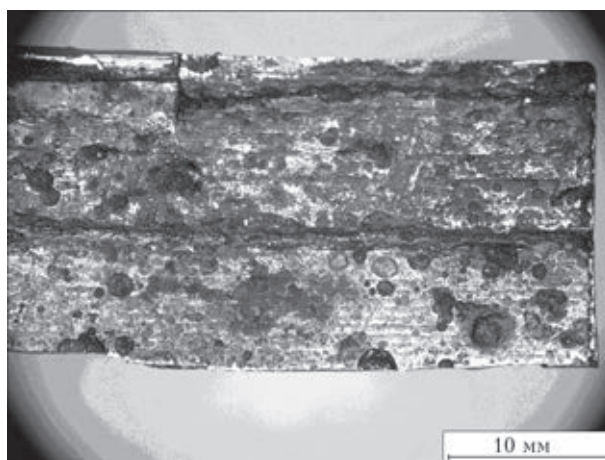


Рис. 8. Поверхность фрагмента исследуемого темплета, контактирующей со средой второго контура

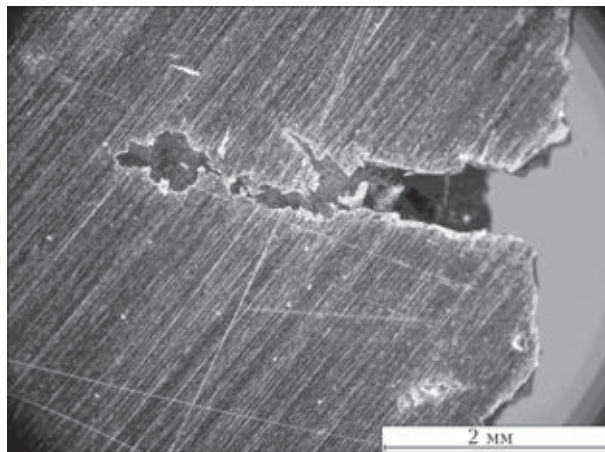


Рис. 9. Коррозионное поражение по линии перехода горизонтального и вертикального участков торцевой плоскости темплета



как язвенная коррозия с локализацией вглубь металла и развитием за период эксплуатации глубиной до 5 мм, глубина язв существенно больше диаметра устья (рис. 10);

– в зоне технологической риски и радиусного перехода язвенные коррозионные поражения ориентированы в продольном направлении, вне указанной зоны они имеют плоскостную, а также объемную форму;

– характер наблюдаемых язв (с перемычками) свидетельствует о периодическом росте повреждения, а интенсивность анодного растворения металла берегов язвы о длительном процессе развития;

– очагов или следов коррозионного растрескивания металла как на поверхности, так и в глубине анклава язв не обнаружено.

В результате проведенных исследований:

– подтверждено наличие протяженных трещиноподобных (плоскостных) несплошностей в металле узла приварки холодного коллектора к парогенератору 1ПГ-3 Калининской АЭС, выявленных в результате УЗК по методике МЦУ-11-98п с Изменением № 1;

– установлено, что повреждение узла соединения коллектора с парогенератором 1ПГ-3 Калининской АЭС имеет коррозионный характер и произошло по механизму язвенной коррозии.

Результаты исследований поврежденного металла холодного коллектора Калининской АЭС показали, что механизм разрушения металла кармана холодного коллектора принципиально отличается от механизма ЗДКР, наблюдаемого на горячих коллекторах.

В процессе выполнения ремонта был выполнен визуальный контроль поверхности кармана эндоскопом «Olympus». Установлено, что коррозионное повреждение металла имеется по всей окружности кармана коллектора. С учетом результатов УЗК можно констатировать и предположить, что:

– на участке, зафиксированном при первичном УЗК, высота плоскостной несплошности,

образованной при язвенном поражении металла, максимальна;

– на других участках УЗ эхо-сигналов, превышающих поисковый уровень (в данной методике это уровень регистрации отражателей), не зарегистрировано. Это позволяет сделать вывод о том, что на этих участках нет плоскостных несплошностей, или они имеют высоту не более 1,0...1,5 мм.

С учетом полученных результатов можно предположить, что на участке узла приварки холодного коллектора к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М, расположенном со стороны днища парогенератора вблизи патрубка Ду 20, имеют место специфические условия для ускоренного в сравнении с другими участками язвенного поражения металла. Эти условия могут быть связаны со многими факторами: напряжениями, действующими на этом узле в данном месте, температурой металла и теплоносителя, химическим составом среды, эффективностью (или неэффективностью) технологических операций по очистке и (или) продувке кармана и др.

Следует отметить, что исследованные очаги коррозионного поражения металла выявлены после 22 лет эксплуатации парогенератора.

Таким образом, исследования и анализ повреждений и результатов неразрушающего контроля узлов приварки холодных коллекторов ПГВ-1000М показал, что:

– существуют два механизма повреждения металла узлов приварки коллекторов к парогенераторам;

– на горячих коллекторах повреждение происходит по механизму ЗДКР;

– на холодных коллекторах повреждение имеет коррозионный характер и происходит по механизму язвенной (электрохимической) коррозии;

– детальное рассмотрение и анализ результатов УЗК позволяет в большей мере оценить картину повреждения металла узла.

Исследования и анализ параметров УЗК узлов на горячих и холодных коллекторах, сопоставление их с результатами визуальных, фрактографических, металловедческих и других исследований показали высокую эффективность ручного УЗК по методике МЦУ-11-98п при выявлении трещиноподобных дефектов в узлах приварки коллектора к парогенератору. Все выявленные несплошности были подтверждены в процессе выемки и исследовании поврежденного металла. Дополнительные детальное исследование и анализ параметров УЗК позволили разработать многофакторную картину повреждения узлов, возможности которой описаны выше.

Отметим, что при выбранном уровне чувствительности УЗК на многих парогенераторах также

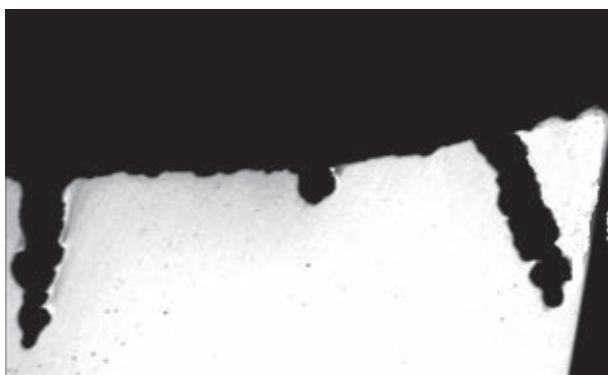


Рис. 10. Протяженные язвенные несплошности на галтели узла ( $\times 10$ )

выявляются и регистрируются одиночные (точечные) отражатели в сварных соединениях № 111. В некоторых случаях они имеют эквивалентную площадь более 7 мм<sup>2</sup> при контроле преобразователем ПЦ-25-1,8П, а менее 7 мм<sup>2</sup> при УЗК прямым и наклонными преобразователями по [5].

Все выявленные на горячих коллекторах продольные несплошности – трещины при контроле преобразователем ПЦ-25-1,8П или ПЦ-30-1,8П имели:

- на отдельных участках амплитуду эхо-сигнала более браковочного уровня;
- значительную протяженность (до ~1300 мм);
- развитие по толщине (высоте) узла от цилиндрической поверхности кармана в сторону наружной поверхности (до 70 мм).

Эти несплошности (в соответствии с пунктами 6.6 и 6.7 МЦУ-11-98п с Изменением № 1) имели признаки трещинообразного дефекта. В связи с этим узел браковался и подвергался ремонту. Случаев ложного бракования не было.

На холодных коллекторах был отмечен только один случай обнаружения и исследования поврежденного металла с выемкой темплета. Он рассмотрен нами выше с точки зрения механизма повреждения металла узла и размеров несплошностей.

На некоторых парогенераторах ПГ-1000 при УЗК по МЦУ-11-98п фиксируют отражатели в районе галтели R20 мм и сварного соединения № 111 с амплитудой соизмеримой с уровнем фиксации. Эти отражатели не имеют признаков трещиноподобного дефекта по амплитуде и по протяженности. Визуальные исследования указывают на их коррозионно-язвенный характер. Целесообразность выполнения ремонта на таких узлах многими специалистами подвергается сомнению.

**Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М.** Для обоснования работоспособности УСКП с повреждениями (несплошностями), описанными в предыдущей методике, с участием специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14).

В первую очередь, с целью анализа причин возникновения и развития повреждений были выполнены расчетные оценки напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения № 111. Нагруженность рассматриваемого узла определялась с учетом рабочих напряжений от давления рабочей среды 1-го и 2-го контура, а также остаточных напряжений, связанных с технологией изготовления или последующего ремон-

та. Расчеты напряжений от рабочего давления на стационарном температурном режиме при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) в стенках кармана проводились в общей трехмерной постановке МКЭ с учетом отсутствия осевой симметрии узла соединения патрубка с корпусом парогенератора. Как показали результаты расчета [10, 11] распределение осевых напряжений  $\sigma_{zz}(P)$  от рабочего давления на внутренней поверхности в зоне сварного соединения № 111 имеет переменный характер по величине в зависимости от окружной координаты. При этом в области самой низкой и высокой длины патрубка расположены зоны низких растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$ , а между ними – зоны высоких растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$  (рис. 11). При этом имеет место резкое снижение растягивающих напряжений по толщине стенки.

Для определения распределения остаточных напряжений использовались численные методы МКЭ и компьютерная программа, входящая в систему «Weldpredictions» [12–14].

Остаточные напряжения определялись по всему объему узла сварного соединения № 111. В зоне соединения остаточные напряжения связаны в основном с технологией выполнения в заводских условиях сварного шва № 111. Штатная технология предусматривает после сварки локальный отпуск зоны соединения с достаточно длительной выдержкой (~ 8 ч) при температуре 650 °С. Расчет показал, что при таком отпуске почти полностью снижаются остаточные сварочные напряжения, но из-за локальности нагрева возникают новые остаточные напряжения. Такое остаточное напряженное состояние характеризуется довольно высокими окружными напряжениями  $\sigma_{\phi\phi}$  и относительно невысокими поперечными  $\sigma_{zz}$  напряжениями, роль которых, тем не менее, в поведении

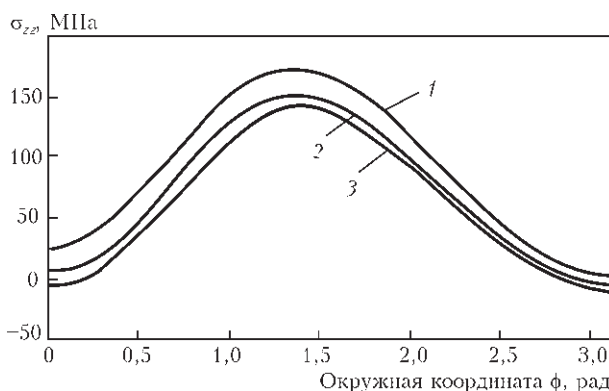


Рис. 11. Расчетные данные (решение в общей трехмерной постановке) по распределению вдоль полуокружности патрубка ПГ напряжений  $\sigma_{zz}$  на внутренней поверхности стенки кармана на высоте  $z = 30$  (1), 50 (2), 70 мм (3) от его дна, вызванное действием рабочего давления при НУЭ ( $\phi = 0$  соответствует самой малой длине патрубка,  $\phi = 3,14$  – самой большой)





наиболее часто обнаруживаемых продольных дефектов значительная.

Распределение суммарных напряжений  $\sigma_{zz}$  по толщине стенки патрубка ПГ на высоте стенки кармана  $z = 50$  мм от его дна, вызванное действием рабочего давления при НУЭ и остаточных напряжений представлено на рис. 12.

Расчетные результаты показали высокий уровень (150...300 МПа) растягивающих напряжений, действующих в зоне сварного соединения № 111, что способствует развитию несплошностей по механизму «коррозия под напряжением». Проведенные в ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины оценки развития коррозионных трещин по механизму циклического нагружения [15], связанного с периодическими гидроиспытаниями и продувкой кармана холодной водой, показал, что циклическое нагружение не является основной причиной повреждений в узле. Для обоснования допустимости эксплуатации парогенераторов с такими повреждениями создан расчетный метод, позволяющий в НУЭ, а также при гидравлических испытаниях, прогнозировать кинетику роста

характерных размеров полуэллиптической трещины (рис. 13), имитирующей рассматриваемый дефект. Разработанный расчетный метод основан на достижениях современной механики разрушения конструкционных материалов с несплошностями трещинообразной формы и эффективном применении соответствующих подходов для прогнозирования поведения таких несплошностей в различных условиях нагружения в весьма ответственных конструкциях, в том числе и в атомной энергетике [16–18].

Поскольку обнаруживаемые дефекты несплошности в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М относятся к поверхностным дефектам (на внутренней поверхности), то для них приемлемо описание как для полуэллиптических трещин. Для полуэллиптической трещины, имитирующей рассматриваемый дефект, характерными являются следующие размеры (см. рис. 13):  $a$  – по глубине и  $2c$  – вдоль поверхности. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  в точках  $D$  и  $G$  рассматриваемого дефекта (полуэллиптической трещины) могут быть рассчитаны в соответствии с рекомендациями [16, 18] с учетом информации относительно распределения напряжений по толщине узла приварки коллектора к патрубку.

Развитие коррозионной трещины во времени  $t$  осуществляется путем последовательного прослеживания изменения начальных размеров  $c_0$  и  $a_0$  на основе зависимости скорости роста коррозионной трещины  $v_m$  от величины  $K_I$  в точках  $D$  и  $G$ . Зависимость  $v_m(K_I)$  может приниматься по диаграмме статической коррозионной трещиностойкости материала (рис. 14), где условно выделены две зоны: первая  $K_I < K_{ISCC}$  – зона роста трещины по механизму анодного растворения и вторая  $K_I > K_{ISCC}$  – зона роста по механизму водородного охрупчивания. Упрощенная диаграмма определяется кривой 2, которую можно приближенно описать в виде:

$$v_m = 0, \text{ при } K_I < K_{ISCC};$$

$$v_m = v_{max} \text{ при } K_I > K_{ISCC}.$$

За время  $\Delta t$  приращение размера  $\Delta a(t)$  и  $\Delta c(t)$  определяется условием:

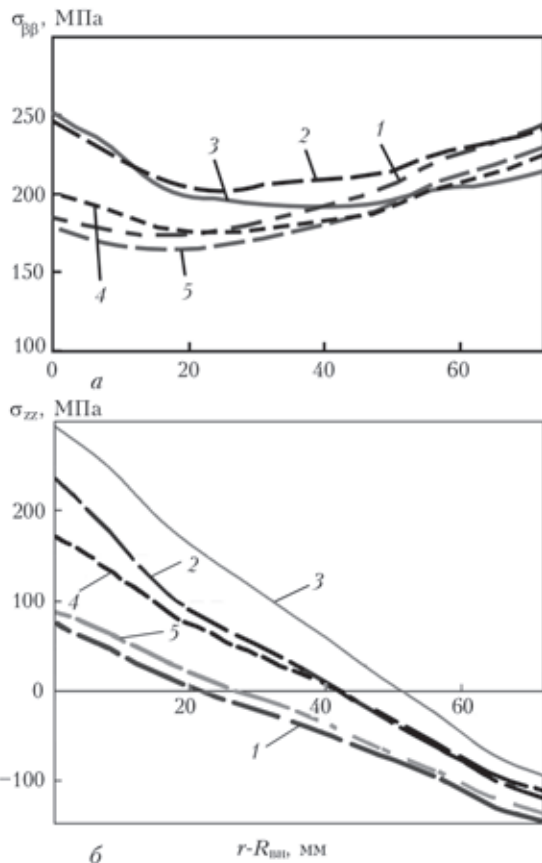


Рис. 12. Распределения суммарных напряжений, вызванных действием рабочего давления при НУЭ и остаточных технологических напряжений, по толщине стенки патрубка ПГ в зоне сварного соединения № 111 на высоте стенки кармана  $z = 50$  мм от его дна в различных сечениях по  $\varphi$  ( $\varphi = 0$  соответствует самой малой длине патрубка,  $\varphi = 3,14$  – самой большой):  $a$  – окружная;  $b$  – осевая компонента (1 – 0 рад; 2 – 0,78; 3 – 1,57; 4 – 2,35; 5 – 3,14)

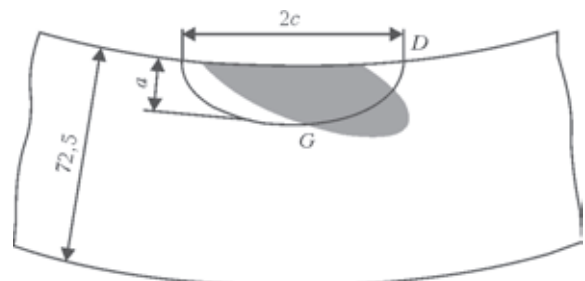


Рис. 13. Схематизация обнаруженной несплошности на внутренней поверхности узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М полуэллиптической трещиной

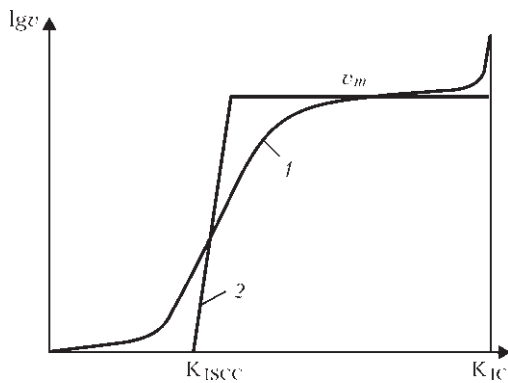


Рис. 14. Диаграммы статической коррозионной трещиностойкости конструкционного материала: 1 – диаграмма  $\lg v - K_I$  по экспериментальным данным, 2 – идеализированная диаграмма

$$\begin{aligned} \Delta a(t) &= v_m \Delta t, \text{ если } K_I(G, t) > K_{ISCC}; \\ \Delta a(t) &= 0, \text{ если } K_I(G, t) < K_{ISCC}; \\ a(t + \Delta t) &= a(t) + \Delta a(t); \\ \Delta c(t) &= v_m \Delta t, \text{ если } K_I(D, t) > K_{ISCC}; \\ \Delta c(t) &= 0, \text{ если } K_I(D, t) < K_{ISCC}; \\ c(t + \Delta t) &= c(t) + \Delta c(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Зависимости (1) используются для отрезка времени  $0 \leq t \leq t_k$ , где  $t_k$  – ресурс безопасной эксплуатации, определяемый условием отсутствия течи, т.е.  $a(t_k) \leq 70 \text{ мм} \approx 0,95 \delta$ .

Условие спонтанного роста (нарушение равновесия) такой трещины можно определить на основе двухпараметрического критерия [17, 19, 20].

Согласно этому подходу равновесие трещины не нарушается, если соблюдается условие

$$K_r \leq f_1(L_r), \quad (2)$$

где  $K_r = K_I/K_C$  – отношение интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины к критическому значению этой величины  $K_C$ ;  $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$  – отношение, определяющее риск вязкого разрушения по механизму пластической неустойчивости;  $\sigma_{ref}$  – напряжение, рассчитываемое только от силового нагружения. Вид функции  $f_1(L_r)$  определяется экспериментально. На рис. 15 приведены такие данные [17] для различных конструкционных сталей, в том числе и для корпусной стали (кривая 2).

В соответствии с экспериментальными данными кривая предельного состояния (критерий спонтанного хрупко-вязкого разрушения) описывается следующим уравнением [17]:

$$K_r n = \left[ 1 - 0,14(L_r n)^2 \right] \left[ 0,3 + 0,7 \exp(-0,65 L_r^6 n^6) \right],$$

при  $L_r < L_r^{\max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T}$ , (3)

$$K_r = 0 \text{ при } L_r > L_r^{\max},$$

где  $n$  – искоемое значение коэффициента безопасности, определяющего отношение предельных нагрузок к действующим, для указанного разрушения.

Условия допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку

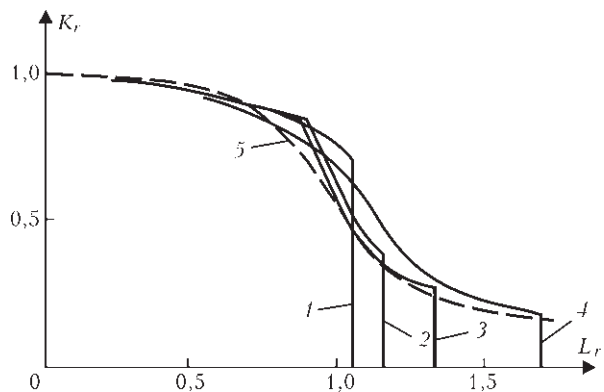


Рис. 15. Диаграммы предельного состояния  $K_r \leq f_1(L_r)$  для конструкционных сталей разного типа [16]: 1 – высокопрочная сталь EN408; 2 – сталь для сосудов давления A533B; 3 – низкоуглеродистая сталь с марганцем; 4 – аустенитная сталь; 5 – расчетная кривая

Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, при дальнейшей эксплуатации на период  $t_k$  до следующего ППР:

- глубина трещины  $a(t_k)$  не достигнет величины 70 мм ( $0,95 \delta$ );
- коэффициент безопасности против спонтанного роста трещины не снизится ниже предельно допустимого значения  $n > 2,0$ .

Точность прогнозирования роста во времени полуэллиптической коррозионной трещины, имитирующей рассматриваемый дефект, зависит от выбора параметров  $K_{ISCC}$  и  $v_m$  диаграммы статической коррозионной трещиностойкости. Для повышения точности прогнозных оценок необходимо получение экспериментальных данных непосредственно для стали 10Г2НМФА при НУЭ с учетом особенностей водно-химического режима второго контура в зоне кармана. До тех пор, пока не получены достоверные экспериментальные данные, при выборе величин указанных параметров целесообразно опираться на литературные данные, например [21, 22], полученные для близких по составу сталей, а также на данные наблюдений за ростом аналогичных дефектов на АЭС Украины и России.

Данные [21] показывают, что для стали A533B (20MnMoNi55) в воде при температуре 288 °С среднее значение скорости роста коррозионной трещины для реакторов типа PWR соответствует приблизительно  $v_m = 10^{-9} \text{ м/с} = 31,5 \text{ мм/год}$ .

На основе обработки экспериментальных дефектограмм коррозионных трещин в зоне сварного соединения № 111-1 1ПГ-1 и 1ПГ-2 Южно-Украинской АЭС [11] получены уточненные параметры  $K_{ISCC}$  и  $v_m$  для идеализированной диаграммы:  $K_{ISCC} = 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и  $v_m = 44 \text{ мм/год}$ , которые можно с определенным консерватизмом использовать для прогноза поведения рассматриваемой трещины в зоне соединения № 111 парогенераторов других АЭС.



Разработанная «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14) устанавливает порядок и процедуру выполнения расчетного обоснования допустимости несплошностей, выявленных в УСКП Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, при дальнейшей эксплуатации на период до следующего ППР.

Апробация Методики была проведена при выполнении работ по определению напряженного состояния и оценке работоспособности после ремонта сварного соединения № 111/1 1ПГ-1, 1ПГ-2 ОП ЮУ АЭС (2004 г.), по расчету постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения № 111/1 4ПГ-3 ОП ЗАЭС по результатам контроля (2006–2010 гг.), по прочностному расчету сварных соединений приварки «холодных» коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС (2009–2011 гг.).

**Южно-Украинская АЭС.** В 2001–2002 гг. на парогенераторах 1ПГ-1 и 1ПГ-2 энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС были обнаружены несплошности металла, идентифицированные как продольные относительно сварного шва № 111 трещины. После выполнения ремонта путем выборки и заварки ме-

талла дефектных участков были выявлены многочисленные поперечные трещины.

В 2004 г. были выполнены работы по определению напряженного состояния и оценке работоспособности после ремонта сварного соединения №111/1 1ПГ-1, 1ПГ-2 ЮУ АЭС. Необходимость в таком прогнозировании была связана с обоснованием технологии ремонта, а главное, с получением данных по остаточным напряжениям, на основе которых необходимо было выполнить оценку работоспособности сварного соединения № 111/1 после ремонта.

Результаты прогнозирования показали, что при сварке (заполнении выборки) перед промежуточным и окончательным отпускком формируется напряженное состояние, когда преобладают окружные напряжения  $\sigma_{\text{вр}}$  по величине. Уровень этих напряжений в зоне выборки 250...260 МПа на внутренней поверхности и 440 МПа на наружной. В периферийной зоне сварного шва соответственно ~ 300 и ~ 270 МПа. Высокий отпуск с местным нагревом до 650 °С практически полностью релаксирует сварочные остаточные напряжения, но после охлаждения возникают новые остаточные напряжения также с преобладанием по величине окружных напряжений  $\sigma_{\text{вр}}$ , уровень которых при 20 °С в зоне выборки 180...210 МПа на внутрен-

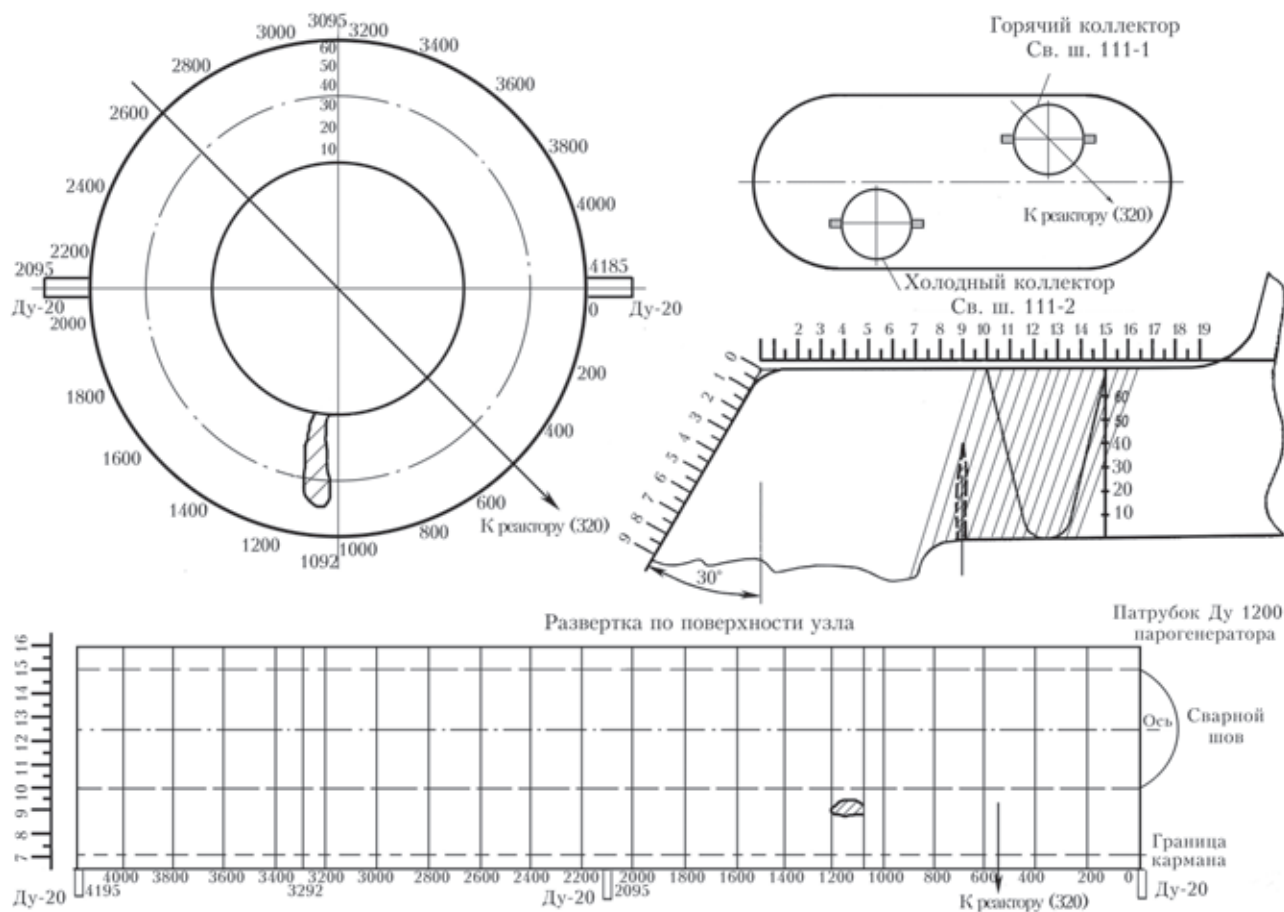


Рис. 16. Дефектограмма УЗК ПГ № 3 блок № 4 ЗАЭС



ней поверхности и 240...260 МПа на наружной. В периферийной зоне сварного шва соответственно 200...225 и 200...250 МПа.

Для оценки работоспособности была принята концепция образования и развития в зоне сварного соединения № 111/1 коррозионных трещин под напряжением. Нагружение рабочей равномерной температурой ~300 °С и соответствующим давлением в коллекторе и корпусе приводит к небольшому увеличению указанных напряжений, т. е. сохраняет заметное преобладание окружных напряжений, что предопределяет достаточно высокий риск образования поперечных коррозионных трещин, аналогично тому, что имело место после первого ремонта. Учитывая достаточно высокие пластические свойства основного материала и материала сварных швов, можно не опасаться хрупких разрушений, связанных с рассматриваемыми коррозионными трещинами. В свете изложенного и, учитывая опыт предыдущего ремонта, была рекомендована эксплуатация отремонтированного сварного соединения с периодическим обследованием не реже одного раза в год.

**Запорожская АЭС.** Во время ППР в 2005 г. УЗК сварного соединения № 111-1 парогенератора ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС показал, что на месте обнаруженной ранее несплошности в виде цепочки отдельных, близко расположенных несплошностей высотой примерно 3...4 мм и длиной около 60 мм образовался дефект с измеряемыми характеристиками, превышающими значения, установленные МЦУ-11-98п и [4], и в соответствии с п. 6.6 МЦУ-11-98п, этот дефект имеет признаки трещинообразного дефекта высотой 40 мм и протяженностью ~ 90 мм (рис. 16, 17).

Учитывая значительный прогресс в механике разрушения тел с трещинами и применения соответствующих ее подходов к прогнозированию работоспособности различных конструкций, в том числе и в атомной энергетике, была выполнена работа по расчету постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения №111/1 ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС.

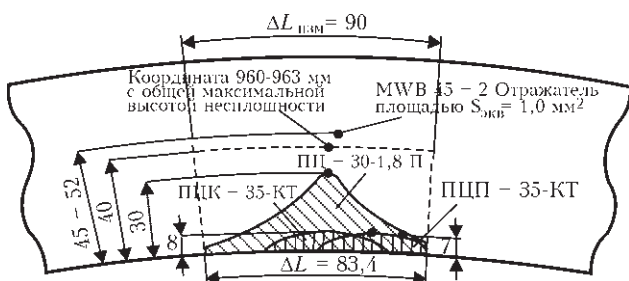


Рис. 17. Картограмма расположения несплошности № 3 сварного соединения № 111/1 (горячий коллектор) ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС по результатам данных Экспертного заключения ФГУП «ЦНИИТМАШ» от 13.01.2006 г.

Задачей работы была оценка современными средствами механики разрушения работоспособности сварного соединения № 111/1 парогенератора 4ПГ-3 с указанным дефектом на период до ППР-2006.

Результаты выполненных расчетных исследований показали следующее:

- в зоне рассматриваемого дефекта действуют рабочие напряжения  $\sigma_{zz}$  (направление  $z$  соответствует нормали к плоскости дефекта), переменные по толщине с максимальными значениями ~53 МПа на поверхности кармана в зоне трещины и 10 МПа на свободной наружной поверхности;

- кроме напряжений от внешней нагрузки следует учитывать остаточные напряжения, связанные с выполнением сварного шва № 111/1 и высоким отпуском после сварки. Уровень этих напряжений от 77 до -56 МПа на поверхности в кармане и наружной поверхности в зоне дефекта;

- развитие рассматриваемого дефекта во времени (рис. 18, 19) на основе современных подходов механики разрушения тел с трещинами в коррозионной среде, выполненное с привлечением упрощенной, достаточно консервативной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости стали 10ГН2МФА, полученной при обработке дефектограмм аналогичных соединений в парогенераторах 1ПГ-1 и 1ПГ-2 Южно-Украинской АЭС, дает основание предсказывать безопасную эксплуатацию по условию появления течи сварного соединения № 111-1 4ПГ-3 ЗАЭС с поверхностным трещинообразным дефектом 40×90 мм на период один год;

- показано, что при гидроиспытаниях парогенератора 4ПГ-3 ЗАЭС перед запуском, а также в процессе эксплуатации риск спонтанного роста развивающейся по коррозионному механизму рассматриваемой трещины полностью исключается.

Эти результаты послужили основой для получения разрешения на пуск энергоблока № 4 ЗАЭС в эксплуатацию с проведением в середине 2006 г. контрольных измерений размеров дефекта. Результаты таких измерений показали, что размеры дефекта увеличились незначитель-

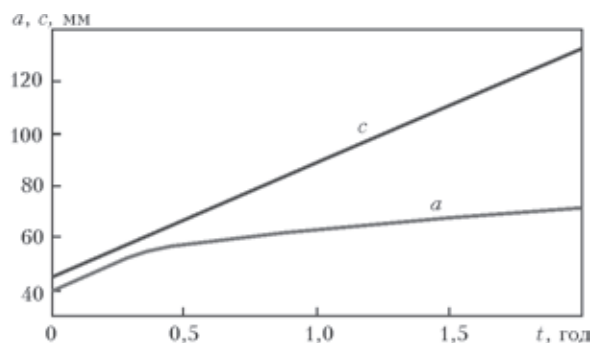


Рис. 18. Прогноз кинетики роста во времени  $t$  исходной трещины  $a_0 = 40$  мм,  $c_0 = 45$  мм для 4ПГ-3 ЗАЭС при  $K_{I,ISS} = 10$  МПа·м<sup>1/2</sup> и  $v_m = 44$  мм/год

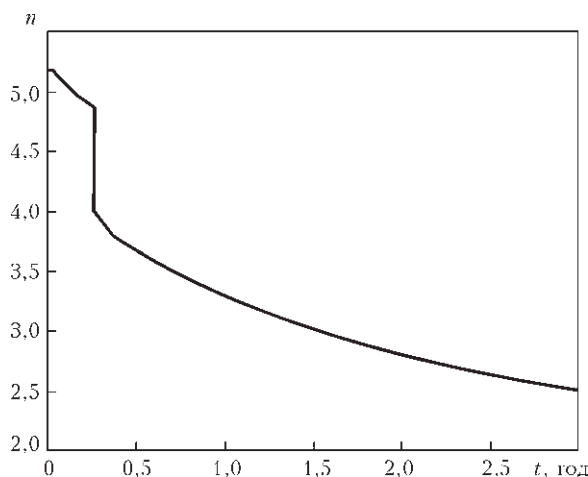


Рис. 19. Кинетика уменьшения коэффициента запаса против спонтанного роста трещины  $a_0 = 40$  мм,  $c_0 = 45$  мм во времени при  $K_{ISCC} = 10$  МПа·м<sup>1/2</sup>

но по сравнению с начальными значениями. Такое расхождение с прогнозом связано с большим консерватизмом исходных данных для расчета относительно стойкости материала сварного соединения к росту коррозионных трещин в среде питательной воды ЗАЭС.

Естественно, что имело основание предполагать, что в период последующих ППР контрольные замеры рассматриваемого дефекта дадут величины, далекие от критических, т. е. будут основания отказаться от весьма затратного ремонта соединения.

В этой связи был выполнен расчет постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения № 111-1 ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС. Задача расчета – определить диапазон возможных сочетаний ожидаемых размеров рассматриваемого дефекта, при которых возможен допуск к дальнейшей эксплуатации парогенератора ПГ-3 энергоблока № 4 ЗАЭС.

Результаты работы показали:

1. Парогенераторы типа ПГВ-1000М М могут быть допущены в безопасную эксплуатацию при об-

наруженных в зоне сварного соединения № 111 коррозионных трещинах при следующих условиях:

- размеры  $a_0$  и  $c_0$  окружных поверхностных трещин не превышают указанных в табл. 1;
- размеры поверхностных трещин вдоль образующей кармана (поперек сварного шва)  $a_0$  и  $c_0$  не превышают указанных в табл. 2;
- очередной контроль размеров указанных дефектов не позже одного года.

2. Если размеры дефектов превышают указанные в табл. 1 и 2, то, учитывая консервативность полученных результатов и высокую стоимость ремонта, заслуживает внимания проведение более прецизионных оценок на основе экспериментальной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости материала в зоне сварного соединения № 111, для чего требуется проведение соответствующих экспериментальных исследований.

На основании результатов прогноза и результатов периодического контроля сварного соединения № 111/1 эксплуатация парогенератора 4ПГ-3 ОП ЗАЭС продлевалась в 2007–2010 гг. Размеры обнаруженной несплошности за указанный период практически не изменились, что свидетельствует о консервативности принятых в расчете характеристик трещиностойкости материала сварного соединения № 111. В 2011 г. после аварии на АЭС «Фукусима» был произведен ремонт данного сварного соединения. Вырезка темплета дефектного участка при ремонте подтвердила наличие коррозионной трещины соответствующих размеров.

**Ривненская АЭС.** В 2009 г. на энергоблоке № 3 ОП «Ривненская АЭС» при контроле состояния парогенераторов ПГ-1–ПГ-4 в зоне сварных соединений № 111/2 холодный коллектор были обнаружены несплошности вдоль оси шва, картограмма одной из них приведена на рис. 20. Характерной особенностью этих несплошностей является их многоочаговый характер (3–6 очагов

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета долговечности  $t_k$  (в годах) безопасной работы сварного соединения № 111/1 с рассматриваемым дефектом (окружная трещина) в зависимости от постулируемых размеров  $a_0$  и  $2c_0$  по результатам контроля ( $v_m = 44$  мм/год)

$2c_0$ , мм	$a_0$ , мм									
	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
	$K_{ISCC} = 10$ МПа·м <sup>1/2</sup> , $n \geq 2,9$					$K_{ISCC} = 15$ МПа·м <sup>1/2</sup> , $n \geq 2,78$				
90	1,845	1,849	1,847	1,845	1,849	2,649	2,654	2,651	2,649	2,653
100	1,732	1,736	1,733	1,731	1,733	2,536	2,540	2,538	2,535	2,540
110	1,618	1,622	1,620	1,618	1,622	2,422	2,426	2,424	2,422	2,426
120	1,505	1,508	1,506	1,504	1,508	2,309	2,313	2,310	2,308	2,312
130	1,391	1,395	1,393	1,390	1,394	2,195	2,199	2,197	2,194	2,199
140	1,277	1,281	1,279	1,277	1,281	2,081	2,086	2,083	2,081	2,085
150	1,164	1,167	1,165	1,163	1,167	1,968	1,972	1,970	1,967	1,971
160	1,050	1,054	1,052	1,049	1,053	1,854	1,858	1,856	1,853	1,858

Таблица 2. Результаты прогнозирования поведения коррозионной поперечной (вдоль образующей) трещины по величинам  $t_k$  и  $n(t_k)$  в зависимости от сочетания  $a_0$  и  $c_0$

$c_0$ , мм	$a_0$ , мм										
	10		15		20		25		30		
	$t_k$ , ГОД	$n(t_k)$	$t_k$ , ГОД	$n(t_k)$	$t_k$ , ГОД	$n(t_k)$	$t_k$ , ГОД	$n(t_k)$	$t_k$ , ГОД	$n(t_k)$	
10	1,284	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	1,256	2,0	1,170	2,0	-	-	-	-	-	-	-
20	1,232	2,0	1,143	2,0	1,056	2,0	-	-	-	-	-
25	1,210	2,0	1,113	2,0	1,029	2,0	0,943	2,0	-	-	-
30	1,166	2,0	1,097	2,0	1,005	2,0	0,915	2,0	0,829	2,0	2,0

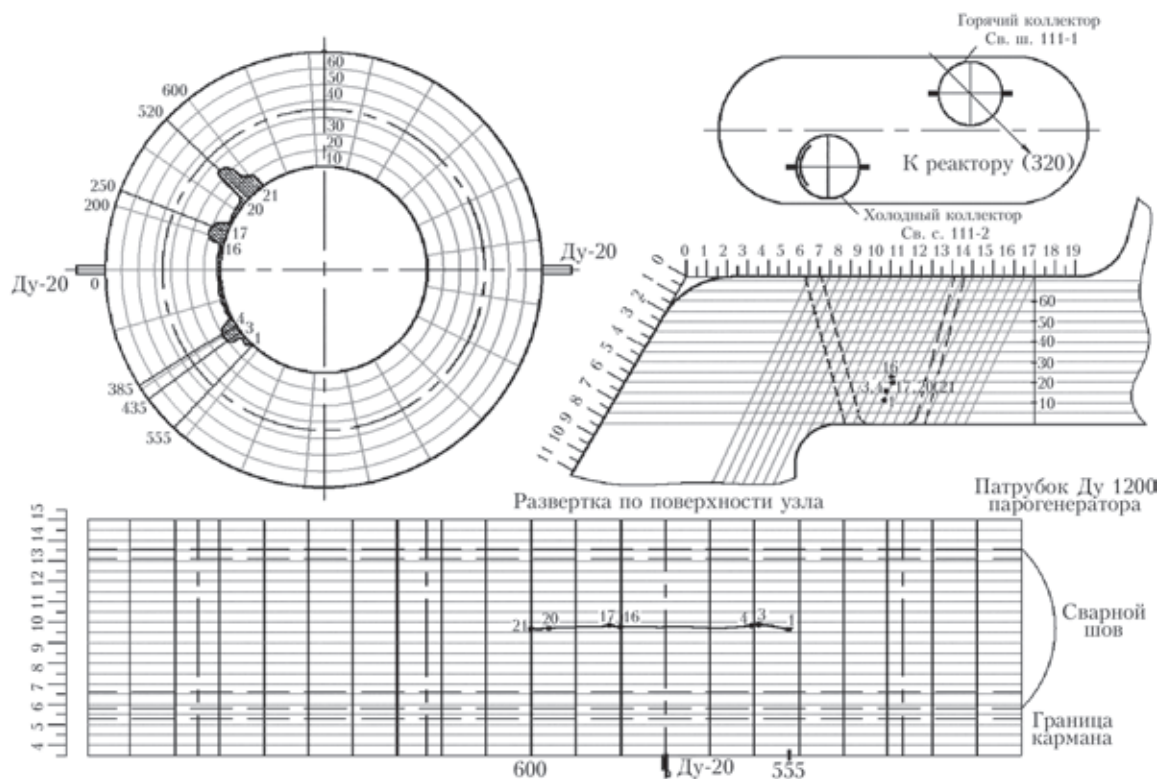


Рис. 20. Картограмма несплошности для парогенератора ПГ-1 при  $a_0=25$  мм,  $2c_0 = 1155$  мм

по длине несплошности), что определяет достаточно большую длину выявленных несплошностей вдоль сварного шва. Наиболее вероятным является механизм коррозионного зарождения, роста и слияния этих дефектов под действием эксплуатационных и остаточных напряжений в зоне сварного соединения при наличии соответствующей агрессивной среды в кармане узла соединения коллектора с патрубком.

С участием специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была выполнена работа по прочностному расчету сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов ЗПГ1–ЗПГ4 блока №3 ОП РАЭС, задачей было определение степени опасности выявленных несплошностей и возможности допуска к дальнейшей эксплуатации блока на срок до одного года с целью соответствующей подготовки АЭС к их ремонту.

Результаты расчетов (табл. 3 и рис. 21) дали основание предсказать безопасную эксплуатацию парогенераторов энергоблока № 3 ОП РАЭС с имеющимися в сварных соединениях № 111/2 отражателями на период в течение одного года, т. е. до следующего ППР 2010 г.

Результаты УЗК сварных соединений № 111/2 парогенераторов ЗПГ1–ЗПГ4 энергоблока № 3 РАЭС, проведенного в период ППР 2012 г. по методике МЦУ-11-98п с изменениями № 1 показали, что характеристики выявленных отражателей (размеры несплошностей) по сравнению с результатами контроля в ППР 2009 г. и ППР 2010 г. развития не имеют.

В то же время, по результатам расчетов, размеры отражателей, которые консервативно рассматривались как коррозионные трещины, за этот период эксплуатации должны были заметно увеличиться.



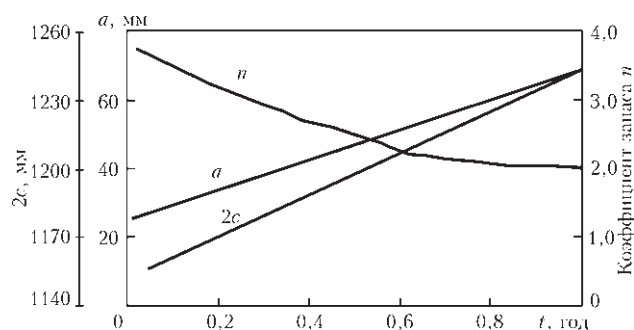


Рис. 21. Результаты расчета кинетики роста трещины и изменения коэффициента запаса за 1 год для парогенератора ПГ-1 ( $a_0 = 25$  мм,  $2c_0 = 1155$  мм),  $2c$  – длина,  $a$  – глубина отражателей (полуэллиптических трещин в расчете);  $n$  – коэффициент запаса с позиций риска спонтанного развития трещины.

Таблица 3. Результаты расчета развития окружных трещин, постулируемых на внутренней поверхности в зоне сварных соединений № 111/2

Номер ПГ	Исходные данные			Через 1 год		
	2c, мм	a, мм	n	2c, мм	a, мм	n
3ПГ-1	1155	25	3,73	1243	69	2,01
3ПГ-2	280	5	7,57	335	49	3,86
3ПГ-3	790	5	7,49	845	49	2,74
3ПГ-4	855	10	5,70	920	54	2,60

Возможно, что отражатели большой длины, но малой глубины, являются несплошностями утонения канавочного типа, а не коррозионными трещинами. Скорость роста дефектов утонения канавочного типа обусловлена в основном механизмом анодного растворения и значительно ниже (обычно не превышает 1–2 мм/год), чем скорость роста трещиноподобных коррозионных дефектов.

Таким образом, опыт эксплуатации сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС с выявленными в 2009, 2010, 2012 гг. отражателями указывает на наличие более высоких коэффициентов запаса с позиций риска спонтанного развития трещин, консервативно постулированных в прочностном расчете сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС 2009 г.

На основании результатов выполненного расчетного прогнозирования поведения выявленных несплошностей и периодического их контроля эксплуатация сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС продлевается до настоящего времени.

Таким образом, накопленный опыт по обоснованию безопасной эксплуатации семи сварных соединений № 111 на различных АЭС Украины с обнаруженными несплошностями показал, что современные расчетные подходы механики раз-

рушения тел с трещинами в коррозионной среде, которые нашли применение в «Методике оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубки Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М», МТ-Т.0.03.308-14 позволяют с достаточным консерватизмом прогнозировать поведение таких несплошностей как коррозионных трещин под напряжением с учетом сложного характера распределения в зоне несплошностей эксплуатационных напряжений и остаточных сварочных напряжений, возникающих при изготовлении или ремонте. Во всех случаях расчетного обоснования продления безопасной эксплуатации указанные сварные соединения № 111 в дальнейшем эксплуатировались без каких-либо аварийных ситуаций и после проведения необходимой подготовки были отремонтированы (1ПГ-1, 1ПГ-2 ОП ЮУ АЭС, 4ПГ-3 ОП ЗАЭС), либо продолжают эксплуатироваться до сих пор (3ПГ1–3ПГ4 ОП РАЭС).

### Выводы

Учитывая актуальность проблемы повреждаемости узла сварного соединения № 111 коллектора к патрубки Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, в НПО «ЦНИИТМАШ» и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ведутся работы по разработке эффективных методов УЗК указанного узла и соответствующих подходов оценки допустимости выявленных несплошностей.

Разработанная специалистами НПО «ЦНИИТМАШ» «Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000» (МЦУ-11-98п) предназначена для контроля металла узла соединения коллектора с патрубком Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М и позволяет эффективно выявлять дефектные зоны.

Для обоснования работоспособности узла соединения коллектора с патрубком в случае повреждений разработана «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубки Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14). Методика позволяет обосновать допустимость дефектов (несплошностей) при эксплуатации узла до следующего планового ремонта.

Апробации разработанных методик были успешно проведены на АЭС России и Украины. Регулярная диагностика этого узла современными методами УЗК и оперативная оценка степени опасности обнаруженных дефектов на текущий момент и на момент следующего планового контроля, уже сегодня позволяет существенно снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов при обеспечении необходимой безопасности эксплуатации АЭС.

1. *ОП 1513–72*. Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985
2. *ПК 1514–72*. Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985
3. *ПНАЭ Г-7-009–89*. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. – М.: Энергоатомиздат, 1990
4. *ПНАЭ Г-7-010–89*. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1990 г.
5. *ПНАЭ Г-7-030–91*. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов, атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки. (Утв. Постановлением Госпроматомнадзора СССР от 31 окт. 1991 г. № 14). – Введ. 1 окт. 1992
6. *ГОСТ 14782–86*. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
7. *ОСТ 108.004.108–80*. Соединения сварные и наплавки оборудования атомных электростанций. Методы ультразвукового контроля. Отраслевой стандарт, 1981
8. *ПНАЭ Г-7-030–89*. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль сварных соединений и наплавки. Методика контроля.
9. *КТА 3201.4*. Компоненты первого контура легководных реакторов. Германия, 1982 г.
10. *Особенности НДС приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М АЭС при эксплуатации и ремонте* / Г. А. Степанов, В. В. Харченко, А. И. Бабуцкий и др. // Проблемы ресурса і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За ред. Б. Є. Патона. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. – С. 181–184.
11. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
12. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.
13. *Numerical Methods for the Prediction of Welding Stresses and Distortions* / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. // *Welding and Surfacing Reviews*. – 1999. – V. 13 – 148 p.
14. *Расчетно-экспериментальное исследование сварочных напряжений в зоне кольцевых стыков трубопроводов ДУ-300 КМПЦ ЧАЭС-3* / В. И. Махненко, О. Г. Касаткин, Е. А. Великоиваненко, В. М. Шекера // Сб. тр. 5-й Междунар. конф. «Материаловедческие проблемы при проектировании и эксплуатации оборудования АЭС». – 1998. – Т. 2. – С. 53–66.
15. *Г. В. Степанов, А. В. Широков.* Оценка кинетики трещины в сварном шве СШ №111 соединения коллектора с патрубком корпуса парогенератора по ресурсу пластичности // Пробл. прочн. –2014. – №3. – С. 96–105
16. *Овчинников А. В., Зубченко А. С.* Интерполяционные формулы расчета коэффициентов интенсивности напряжений для сосудов давления и трубопроводов // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Реакторные установки с ВВЭР. Вопросы прочности*. – 2010. – Вып. 27. – С. 58–70.
17. *Milne L., Ainsworth R.A., Dowling A.R., Stewart A.T.* Assessment of the integrity of structure containing defects, CEGB R6, Rev. 3, May 1986.
18. *MP-125-01–90.* Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. – Киев, 1990. – 55 с.
19. *Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Ed.* American Petroleum Institute, Washington, D.C., January 2000.
20. *R6: Assessment of the integrity of structures containing defects.* British Energy Generation Report R/H/R6, Revision 4, 2001.
21. *Magdowski R., Kraus A., Speidel O.* Environmental Degradation Assessment and Life Prediction of Nuclear Pressure Vessels and Piping Steels // *Proc. of Int. Symp. On Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures (15–18 May, 1995, Sapporo, Japan)*. – Sapporo, 1995. – P.897–902.
22. *Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию* / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, О. Ю. Петрова, И. Л. Харина // *Машиностроение и инж. образование*. – 2007. – № 4. – С. 35–41.

One of the main problems of safe service of PGV-1000M steam generators is corrosion damage of the assembly of welding header to tube of Dn 1200. Procedures for ultrasonic testing of this assembly and assessment of admissibility of detected defects of discontinuity type are considered. Developed procedures have been tested in a number of Russian and Ukrainian NPP. Their application will allow operative assessment of the degree of criticality of the detected defects and reducing the scope of work on repair and replacement of defective steam generators. 22 references, 3 Tables, 21 Figure.

*Key words*: PGV-1000M, assembly of header to tube joint; stress corrosion cracking, prediction, stress-strain state, semielliptical crack, discontinuity schematization, diagram of static corrosion crack resistance of material

Поступила в редакцию  
16.07.2014