

ЦЕЛОСТНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ (СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ)

В.Д.Бергункер
ОКБ "Гидропресс"

ВВЕДЕНИЕ.

Как известно, на зарубежных и российских АЭС используются парогенераторы (ПГ) принципиально разных конструкций. За многие годы эксплуатации эти конструкции заметно эволюционировали, причем в большинстве случаев эволюция стимулировалась проблемами, возникавшими при эксплуатации. Одной из основных проблем была проблема большого количества глушений ТОТ из-за массового образования дефектов.

Есть основания полагать, что именно сравнение специфики образования дефектов на различно ориентированных теплообменных поверхностях с различным характером обтекания может дать ключ к пониманию механизмов и причин образования и развития дефектов.

Различие материалов теплообменных труб (ТОТ), их диаметров и толщины стенок имеет большое значение для различных аспектов целостности ТОТ, но не является принципиальным препятствием для сравнительного анализа.

Рассмотрение и анализ проведен только по основным направлениям обеспечения целостности, что связано, прежде всего, с ограниченными объемами доклада. Рассматриваемая проблема столь широка, что даже вошедшие в данную работу вопросы изложены предельно кратко.

Проблемы с ТОТ на ВПП являются ярким примером неудачного выбора конструкционного материала для оборудования реакторных установок. Сплав 600МА (Alloy 600 mill annealed) был использован в США и большинстве других стран для изготовления патрубков СУЗ и КИП на крышках реакторов и некоторых других патрубков первого контура. И во всех этих узлах имеются проблемы. Крышки реакторов заменяются на PWR почти с тем же темпом, что и ПГ. Причем, если в США замены осуществляются после обнаружения дефектов (к 2004 году 10 крышек были заменены, и 23 планировалось заменить), то во Франции замена идет непрерывно (44 из 54 заменены к 2005 году).

Замена ВПП из-за проблем с ТОТ из сплава 600МА давно стала рутинной процедурой. Таких ПГ в мире было около 350 штук. К середине 2006 года их осталось около 70.

В данной работе приведены ссылки только на основные источники информации. Значительная часть цифровой информации по глушениям ТОТ в США взята из отчетов АЭС США, свободный доступ к которым открыт на сайте U.S. NRC. Данные по глушениям ТОТ ВПП АЭС Японии также имеются в свободном доступе на сайте METI.

1. ЭВОЛЮЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПГ.

1.1 Материал теплообменных труб

В данной работе эволюция ПГ рассматривается только с точки зрения целостности ТОТ. Первоначальный выбор материала для ТОТ ПГ АЭС в СССР и США был одинаков. Однако применение нержавеющей стали SS304 на первой коммерческой АЭС США (Shippingport) дало быстрый отрицательный результат (течь двух ТОТ ПГ через 150 часов после пуска) в начале 1957 года [1]. Неудачный опыт применения нержавеющей стали для ТОТ ПГ продолжили АЭС "Yankee Row" и "Indian Point-1", а также некоммерческие реакторы "Savannah River", "Hanford" и "Nautilus" [1].

Значительная часть проблем с ТОТ на вертикальных ПГ связана с неудачным выбором нового материала для ТОТ (высокониッケлевого сплава 600МА) в США и всех остальных странах. В этих странах оборудование АЭС (или ПГ для них) было изготовлено фирмами США или по лицензиям США. Единственной страной, быстро, самостоятельно и удачно отказавшейся от сплава 600МА, оказалась Германия. После опыта, полученного на АЭС "Obriheim", ТОТ ПГ которой были тоже из сплава 600МА, в новых конструкциях был применен сплав 800NG. Специфика конструкции и удачный выбор материала привели к тому, что на вертикальных ПГ Германии с трубами из сплава 800NG проблемы с ТОТ (связанные с коррозией) - минимальны. Хотя, если рассматривать не только коррозионные причины нарушения целостности ТОТ, то сравнение долей заглушенных ТОТ на всех германских ПГ и российских ПГВ-1000 показывает практическое равенство по этому параметру (около 0,6%)!

США и все остальные страны вынуждены были начать с 1980 (АЭС "Surry-2", дентинг) года замены ПГ с ТОТ из сплава типа 600МА на ПГ с ТОТ из сплава 600ТТ (в США - 17 АЭС, 281000 ТОТ). До 2002 года на ПГ из этой стали (в США) было заглушено 1400 ТОТ (до 2005 года – более 1700, к середине 2006 года - 1884), причем большинство - из-за износа в зоне гибовых решеток. Только в 2002 году в США на ТОТ из этого сплава впервые были отмечены дефекты КРН [2]. Во Франции и Южной Корее коррозионные дефекты на ТОТ из этого сплава отмечались и ранее [3]. Имел место и разрыв ТОТ в 2002 году на одном из ПГ АЭС "Ulchin-4" в Корее [9], о чем детально будет изложено ниже.

С 1988 года (АЭС "D.Cook") большая часть выводившихся из эксплуатации ПГ заменялись на новые с ТОТ из сплава 690ТТ. Коррозионных проблем не отмечалось, большинство глушений производилось из-за виброизноса в очень небольших масштабах. На конец 2005 года на ПГ США с ТОТ из этого сплава было заглушено 395 ТОТ (данные по 78 ПГ 26 блоков). Однако в середине 2005 года первый же контроль ПГ АЭС "Osonee-1" (после замены – 14 месяцев) дал новые поводы для беспокойства. Виброизнос имел место почти во всех зонах дистанционирования на 3200 ТОТ [10]. Заглушено 48 ТОТ. Причины пока не установлены. Однако, как сказано в презентационном материале АЭС (на совещании в NRC) к останову блока №2 в октябре 2005 "готовятся 200 заглушек". По последним данным на блоке №2 заглушено всего 5 ТОТ.

Имели место и три течи на ТОТ ПГ из этого сплава.

Столь же неудачен был и выбор материала для дистанционирующих пластин. Первоначальный выбор углеродистой стали и конструкции со сверленными отверстиями для этих элементов в первых моделях, был признан причиной такого специфического только для ВПГ явления, как дентинг. В настоящее время в ВПГ для этих элементов используется нержавеющая сталь.

В ГПГ, как известно, нержавеющая сталь для дистанционирующих элементов была применена с самого первого ПГ.

1.2 Конструкция. Теплообменные трубы

Важным конструктивным решением был выбор диаметра и толщины стенки ТОТ. На ВПГ используются несколько типоразмеров ТОТ. Основных (ВПГ фирмы Westinghouse) два: 19,05x1,05 мм ($k=0,055$) и 21,43x1,23 ($k=0,057$). На последних моделях ("F", "D75" и другие) ТОТ имеют размер 16,86x1,02 мм ($k=0,060$) и 19,05x1,09 ($k=0,057$). На ВПГ фирмы B&W используются ТОТ с размером 15,88x0,86 мм ($k=0,054$). На ВПГ фирмы CE используются ТОТ с размером 19,05x1,22 мм ($k=0,064$) и 19,05x1,03 ($k=0,054$) мм. В Японии используется единый типоразмер 22,23x1,27 мм ($k=0,057$), в Германии – 22,0x1,23 ($k=0,056$).

На ГПГ используются только два типоразмера: 16,0x1,5 ($k=0,094$) и 16,0x1,4 ($k=0,088$). Этот выбор значительно повысил способность ТОТ ГПГ противостоять и коррозии и разрывам.

1.3 Конструкция. Дистанционирующие элементы

Одной из причин интенсивного повреждения ТОТ на ВПГ был не самый удачный выбор конструктивного решения зоны дистанционирования. По данным [4] на 2002 год из 237 АЭС (во всем мире) 42% имели в ПГ дистанционирующие пластины со сверленными отверстиями ("drilled hole"). Около 60 % АЭС из них заменили ПГ, причем на новых ПГ применены иные конструкции дистанционирования (27%-решетчатые ("grid/eggcrate"), 73% - фрезерованные ("broached"), - с тремя и четырьмя зонами контакта). Все замененные ПГ имели дистанционирование типа "drilled hole". Следует отметить, что одновременно с изменением конструкции решеток был изменен и материал дистанционирующих элементов. Вместо углеродистой стали начала использоваться нержавеющая сталь.

Изменение конфигурации этой зоны ТОТ должно было существенно изменить ситуацию с коррозией. Так оно и произошло. Около 20 лет эксплуатации ВПГ с ТОТ из сплава 600ТТ с новыми конструкциями зоны дистанционирования показали отсутствие дентинга, а также КРН с МКК. Первые дефекты в зонах дистанционирования появились на ПГ США только в 2002 году. Здесь, видимо, следует упомянуть о том, что такое развитие коррозионных процессов на ТОТ из новых сплавов прогнозировалось во многих работах одного из ведущих специалистов США по коррозии – R.W.Staehle. Критически оценивая методологию выбора новых материалов (полагая ошибочным и выбор сплава 690ТТ), он заявлял, что требуется время (для разных факторов – 10-20 лет), чтобы для интенсивных коррозионных процессов сформировались условия. Детально эта позиция изложена, например, в [11]. По мнению этого автора, отсутствие коррозии на ТОТ из новых сплавов является в значительной степени результатом конструктивных изменений в зонах дистанционирования и заделки, а не только лишь результатом выбора нового материала.

На ГПГ изначально используется дистанционирование ТОТ на основе дистанционирующих планок (вариант, к которому США пришли методом проб и ошибок – "grid/eggcrate"- очень близок к традиционному для ГПГ).

1.4 Конструкция. Зона заделки.

Это одно из самых опасных мест локализации всех видов коррозии в ВПГ. И вновь следует отметить, что одной из главных причин было неудачное конструкторское решение: в первых моделях вальцовка (механическая) проводилась только на небольшом участке зоны заделки, так что оставался почти полуметровой высоты кольцевой зазор. В ПГ разных моделей с ТОТ из сплава 600МА эту проблему решить не удалось. С модели 51 фирмы Westinghouse

вальцовка ТОТ в трубных досках проводилась на полную длину сначала взрывным методом ("чтобы исключить щелевые зазоры"[6]), затем механическим, и, наконец, с модели "D5" – гидравлическим. Предпринят ряд других мер, исключающих перевальцовку, снижающих напряженное состояние в переходной зоне и т.п. Решение проблем в узле заделки, учитывая большую номенклатуру моделей ВПГ, заслуживает отдельного рассмотрения. Достаточно подробно некоторые вопросы рассмотрены в [24]. В новых моделях ПГ в разной степени учтены прежние ошибки. В этих зонах ВПГ с ТОТ из сплавов 600ТТ и 690ТТ некоторое время не обнаруживали дефектов. Но уже в 1998 году дефекты в этой зоне были обнаружены на ряде ПГ с ТОТ из сплава 600ТТ во Франции, затем в Корее.

1.5 Конструкция. Антивибрационные решетки на гйбах.

Износ в зоне гибовых решеток имел место на всех моделях ВПГ. Это неизбежное следствие более высоких скоростей движения воды во втором контуре. Первоначальные конструкторские решения не были оптимальными, но на фоне интенсивных коррозионных процессов этот механизм повреждения почти не выделялся. Тем не менее, работы по улучшению конструкции закрепления ТОТ на гйбах велись почти непрерывно. Зазоры за счет сверхточного изготовления и сборки и контроля были снижены до 0,1 мм. На некоторых ВПГ в США и Японии проведены замены антивибрационных решеток, однако существенного успеха и это мероприятие не принесло. В 2004-2005 годах на нескольких японских АЭС именно после замены антивибрационных решеток резко возросло количество глушений. Так, например, на АЭС "Tsuruga-2" (материал ТОТ ПГ – сплав 600ТТ), где до контроля в декабре 2004 года было заглушено всего 4 ТОТ, пришлось заглушить 475 ТОТ. И, хотя на каждом ПГ этой АЭС по 13524 ТОТ, при таких темпах роста количества глушений, процесс может стать опасным.

1.6 Прочие мероприятия

К числу таких мероприятий следует отнести разные варианты довальцовок и упрочнения (термическое упрочнение и несколько видов механического) на различных участках ТОТ. Эти операции осуществлялись как на новых, так и на эксплуатирующихся ПГ. Кроме того, для ремонта ТОТ широко использовались различные виды втулок и несколько способов их закрепления. Эта ремонтная операция породила несколько новых проблем.

Имели место и другие мероприятия по повышению целостности: совершенствование водного режима, замена оборудования водопитательного тракта, механические очистки и химические промывки, совершенствование техники и методологии контроля ТОТ, организационные и другие мероприятия. Однако заметных успехов вся эта работа на ВПГ из сплава 600МА не принесла. По мнению многих специалистов, проблемы с коррозией ТОТ из сплавов 600ТТ и 690ТТ могут возникнуть в ближайшие несколько лет.

Эволюция горизонтальных ПГ рассматривается подробно в [19,20].

Анализ приводит к выводу, что все недостатки простой и дешевой стали, примененной для ТОТ российских ГПГ, были скомпенсированы удачными конструкторскими решениями (история их интересна, но не является темой данной работы). Причем важнейшим аспектом решения является не только горизонтальность расположения трубного пучка и вертикальность трубных досок (коллекторов). Важным, на наш взгляд, является использование кипения в большом объеме при естественной циркуляции воды второго контура. Именно это

решение исключило проблему виброизноса на горизонтальных ПГ, решение которой для вертикальных ПГ пока не найдено. И из-за этого, в том числе, совершенно по иному реализуются и другие механизмы образования дефектов. Причем у ГПГ имеется потенциал практического исключения дефектов путем реализации ряда известных технических мероприятий. Высокий уровень дефектности и глушения на ПГ США вызван не только неудачным выбором материала, но и, как показывает анализ, целым рядом неудачных конструкторских решений. Кроме того, свой вклад внесли и неудачные технологии (например, - фосфатный водный режим). Иного пути, чем замены ВПГ, в США (и других странах) не было.

ГПГ уже доказали способность работать практически без глушений при соблюдении некоторых условий даже без замены оборудования водопитательного тракта. Это свидетельствует о высокой живучести ГПГ, но ни в коей мере не снимает вопрос о необходимости замены этого оборудования.

2. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Есть основания полагать, что именно сравнение специфики образования дефектов на различно ориентированных теплообменных поверхностях с различным характером обтекания может дать ключ к пониманию механизмов и причин образования и развития дефектов ТОТ. Аналогия рассматривается только для ВПГ с ТОТ из сплава 600МА и ГПГ с ТОТ из стали 08Х18Н10Т, поскольку, несмотря на принципиальное отличие материалов, склонность к образованию значительных количеств дефектов у них оказалась сравнимой. Удивительное сходство коррозионного поведения стали в фундаментальных экспериментах (прежде всего – для коррозии под напряжением) стали SS304 (аналога стали 08Х18Н10Т) и сплава 600МА отмечено в [7].

Кроме того, объемы информации и исследований по этим материалам достаточны для анализа.

На рис.1 [7] приведена широко известна диаграмма зависимости коррозионной стойкости сплавов от содержания в них никеля. ("коррозионная яма").

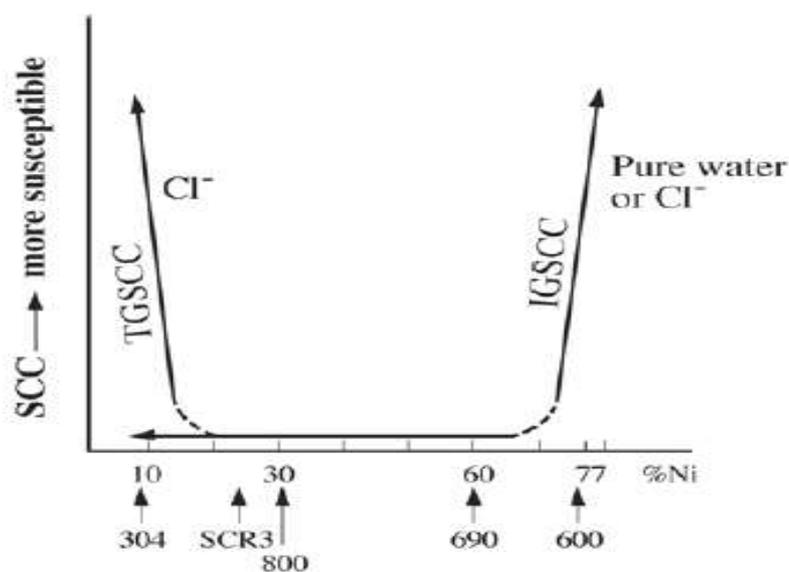


Рис.1. Зависимость коррозионной стойкости сплавов от содержания никеля

Используемая для российских ТОТ сталь 08Х18Н10Т и использовавшийся для ТОТ ВПГ сплав 600МА оказались на противоположных сторонах "коррозионной ямы". Российская сталь имеет высокую склонность к транскристаллитной коррозии под напряжением, американский сплав – к межкристаллитной коррозии под напряжением. Как показал опыт эксплуатации, именно эти два коррозионных процесса и определяли в основном деградацию ТОТ ПГ на ВПГ и ГПГ. Еще один механизм – язвенная коррозия и ее разновидность – питтинговая коррозия – наблюдается на ТОТ и ГПГ и ВПГ.

Фактически коррозионные процессы со стороны второго контура для этих материалов развиваются аналогично, отличает их только интенсивность.

Интенсивность коррозионных процессов в ВПГ и ГПГ можно сравнить.

3 ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

Есть несколько способов сравнить эти процессы. Самый простой – сравнить количества замененных ПГ и количества заглушенных ТОТ.

3.1 Остановы блоков

Шесть энергоблоков с PWR в США [1,2] с ВПГ были остановлены с указанием значительного вклада в причины остановки проблем с ТОТ:

Haddam Neck (1968-1997, 560 МВт), - 1228 заглушенных ТОТ к 1995 году

Maine Yankee (1973-1997, 860 МВт) – 574 заглушенных ТОТ и 17000 втулок к 1995 году.

Trojan (1976-1992, 1095 МВт) - 2444 заглушенных ТОТ и 1000 втулок

San Onofre-1 (1968-1992, 436 МВт -1456 заглушенных ТОТ и 7000 втулок

Zion-1 (1974-1998, 1040 МВт – 948 заглушенных ТОТ к 1995

Zion- 2 (1974-1998, 1040 МВт) – 552 заглушенных ТОТ к 1995

Ни один блок АЭС с ГПГ из-за проблем с ТОТ из эксплуатации пока не выводился. Остановленные блоки АЭС "Норд" (5 блоков) и АЭС Козлодуй (2 блока) и Армянской АЭС (1 блок) – не учитывались. Вывод этих блоков из эксплуатации не был связан со снижением работоспособности ПГ.

3.2 Замены парогенераторов

Основные данные о заменах ВПГ приведены в таблице 1

Таблица 1. Замены ВПГ из-за проблем с ТОТ из сплава 600 МА

| Параметр | ВПГ США | ВПГ Франции | ВПГ Японии | Прочие |
|-------------------------|---------|-------------|------------|--------|
| Всего ПГ | 209 | 198 | 68 | 175 |
| ПГ с 600МА | 176 | 63 | 29 | 59 |
| ПГ с 600ТТ | 33 | 111 | 20 | ??? |
| ПГ с 690ТТ | 0 | 24 | 19 | ??? |
| Всего заменены | 121 | 45 | 29 | 53 |
| Заменены на ПГ с 600ТТ | 25 | 0 | 0 | ??? |
| Заменены на ПГ из 690ТТ | 93 | 45 | 29 | 26 |
| Заменены на ПГ из 600МА | 3 | 0 | 0 | - |
| Заменены на ПГ из 800NG | 0 | 0 | 0 | 10 |
| Средний срок (лет) | 18,1 | 17,9 | 20,4 | - |
| Максимальный срок (лет) | 31 | 25 | 26 | - |
| Минимальный срок (лет) | 8 | 10 | 11 | - |

Из 176 (на 57 блоках) ВПГ с ТОТ из сплава 600МА заменены и заменяются в 2005 127 ПГ на 43 блоках (на 01.01.06). К 2009 в соответствии с опубликованными планами [14] останется только 5 ПГ на 2 блоках. Поскольку зачастую планы меняются по срокам, для оценки состояния действующих ВПГ в данной работе приведены данные по 55 ВПГ на 20 блоках (из них 4 планировали замену в 2005, но провели в 2005 контроль ТОТ).

Как следует из таблицы, эпопея замен ПГ с ТОТ из сплава 600МА близка к завершению. К 2010 году, видимо, в мире не останется ни одного такого ПГ (лишь несколько штук в США). Их было почти 350. Замена одного ПГ стоила около 100 миллионов долларов.

Важно отметить следующий факт. Несмотря на достаточно большой положительный опыт Германии по использованию ВПГ с ТОТ из сплава 800NG, и широкую номенклатуру поставщиков ПГ для замены, в США нет ни одного ПГ с ТОТ из этого сплава.

В мире эксплуатируется 104 ПГВ-1000 и 162 ПГВ-440.

Из 104 ПГВ-1000 шесть ГПГ заменены из-за проблем с ТОТ. На действующих ПГВ-1000 заглушено – около 7500 ТОТ – по 72 ТОТ на ПГ. На шести замененных ПГ заглушено около 6000 ТОТ.

Все 162 ПГВ-440 эксплуатируются без замен. На действующих ПГВ-440 заглушено около 12000 ТОТ – по 74 ТОТ на ПГ.

Средний возраст ПГВ-1000 – 12,7 лет (если исключить молодые блоки (26 ПГ эксплуатируются меньше 5 лет) – 16 лет). Более 15 лет эксплуатируется 58 ГПГ. На них заглушено около 6900 ТОТ (по 119 ТОТ на ПГ). На остальных 46 ГПГ заглушено около 700 ТОТ (по 14 ТОТ на ПГ).

Максимальный возраст ПГВ-1000 – 22 года.

Минимальный возраст ПГВ-1000 – 2 года

Минимальный возраст замененных ПГВ-1000 – 9 лет.

Средний возраст ПГВ-440 – 23,2 года.

Максимальный возраст ПГВ-440 – 34 года (НВАЭС-3).

Минимальный возраст ПГВ-440 – 7 лет.

3.3 Глушение теплообменных труб

Количество заглушенных ТОТ на 121 замененном ПГ - более **61500** – по 508 ТОТ на ПГ (по двум АЭС нет документированных данных, для ряда АЭС данные имеются не для последнего контроля). Кроме того, более **30000** ТОТ имели втулки. К этим цифрам имеет смысл добавить еще **7200** заглушенных ТОТ и 25000 ТОТ с втулками на шести выведенных из эксплуатации блоках.

Максимальное количество ТОТ, заглушенных на одном блоке – **3748** (Palisades-1), на одном ПГ – **2077** (Oconee-1).

Средний возраст замененных ВПГ (600 МА) – 18, 1 года

Максимальный возраст замененных ВПГ (600 МА) – 31 год (Prairie Island-1 (2004), Oconee-3 (2005))

Минимальный возраст замененных ВПГ (600 МА) – 8 лет (Surry-2 (1980)). Кроме того, на 15 блоках ВПГ заменены менее, чем через 15 лет после пуска.

Количество заглушенных ТОТ на 20 действующих блоках и 55 ВПГ – составило **28279** ТОТ – по **511** ТОТ на ПГ. Максимальное количество глушений на блок – **4268** ТОТ (Saint Lucie-2). Эта АЭС имеет и максимальное количество заглушенных ТОТ на одном ВПГ, оба ПГ этой АЭС – имеют рекордное количество глушений – 1932 на ПГ А и **2336** – на ПГ В. Рекордным оказался и ППР-2005 – 798 (ПГ1) и 837 (ПГ2) заглушенных ТОТ (В ППР-2006 – 463+627).

Детальная информация о глушениях ТОТ на действующих ВПП США приведена в таблице 2. В этой таблице продолжают существовать уже замененные за время формирования доклада шесть ВПП. Кроме того, в таблицу введены данные о ПП АЭС "Palisades", которая относится и к АЭС заменившим ПП, и к АЭС, эксплуатирующим ПП с ТОТ из сплава 600 МА. На этой АЭС произошла единственная в мире замена ПП с ТОТ из сплава 600МА на ПП с ТОТ из сплава 600МА (в 1990 году). Количество втулок на действующих ПП – не менее, чем 3084 штуки.

Таблица 2 – Количество заглушенных ТОТ на действующих ВПП США

| Год пуска | АЭС | Мощность | Фирма, тип ПП | Кол. ПП | Кол. ТОТ в ПП | Год замены | Количество заглушенных ТОТ |
|-----------|---------------------|----------|---------------|---------|---------------|------------|----------------------------|
| 1974 | Arkansas One-1 | 836 | B&W, FA177 | 2 | 15531 | 2005 | 1704 |
| 1976 | Beaver Valley-1 | 810 | WEST, M51 | 3 | 3388 | 2006 | 1952 |
| 1987 | Beaver Valley-2 | 820 | WEST, M51M | 3 | 3388 | нд | 440 |
| 1990 | Comanche Peak-1 | 1150 | WEST, D4 | 4 | 4578 | 2007 | 776 |
| 1977 | Crystal River-3 | 818 | B&W, FA177 | 2 | 15531 | 2009 | 1213 |
| 1978 | Davis Besse-1 | 873 | B&W, FA177 | 2 | 15531 | нд | 823 |
| 1985 | Diablo Canyon-1 | 1073 | WEST, M51 | 4 | 3388 | 2009 | 825 |
| 1986 | Diablo Canyon-2 | 1087 | WEST, M51 | 4 | 3388 | 2008 | 890 |
| 1974 | Fort Calhoun-1 | 476 | CE, S67 | 2 | 5005 | 2006 | 753 |
| 1990 | Palisades | 762 | CE, M2350 | 2 | 8219 | нд | 775 |
| 1980 | Palo Verde-1 | 1270 | CE, S80 | 2 | 11012 | 2005 | 2076 |
| 1988 | Palo Verde-3 | 1270 | CE, S80 | 2 | 11012 | 2007 | 1500 |
| 1974 | Prairie Island-2 | 512 | WEST, M51 | 2 | 3388 | нд | 500 |
| 1981 | Salem-2 | 1106 | WEST, M51 | 4 | 3388 | 2006 | 1100 |
| 1983 | San Onofre-2 | 1070 | CE-3410 | 2 | 9350 | 2009 | 2383 |
| 1984 | San Onofre-3 | 1080 | CE-3410 | 2 | 9350 | 2010 | 1355 |
| 1982 | Sequoyah-2 | 1106 | WEST, M51 | 4 | 3388 | нд | 507 |
| 1983 | St. Lucie-2 | 839 | CE, S3410 | 2 | 8519 | 2007 | 4268 |
| 1973 | Three Mile Island-1 | 786 | B&W, FA177 | 3 | 15531 | 2009 | 2532 |
| 1985 | Waterford-3 | 1075 | CE, CE70 | 2 | 9350 | 2005 | 1524 |
| 1996 | Watts Bar-1 | 1170 | WEST, D3 | 4 | 4674 | 2006 | 1158 |

Средний возраст действующих ВПП США (600 МА)– 22,8 года

Максимальный возраст действующих ГПП (600 МА) – 31 год. Это АЭС ANO-1 (все ПП заменены в 2005 году) и Prairie Island-2 (о планах замены не объявлялось).

Минимальный возраст действующих ГПП (600 МА) – 10 лет (Watts Bar-1 – ВПП заменяются в 2006 году)

Таким образом, подводя итоги по ВПП США с ТОТ из стали 600МА, можно утверждать, что количество глушений на этих ПП составляет не менее, чем **97000** ТОТ. Количество ремонтных втулок – не менее чем **56000**. В 1998 году по данным EPRI на всех ВПП США было заглушено 39274 ТОТ и было установлено 15900 ремонтных втулок. В 1993 году соответствующие цифры были 10000 заглушек и 12000 втулок, а в 1989 – 1000 и 3000. Однако следует иметь в виду, что в 1993 и 1989 годах количество энергоблоков и парогенераторов было меньшим.

Данные по глушениям на ВПП с ТОТ из сплава 600МА в других странах пока не систематизированы. Но некоторые цифры имеются: Франция – 14500 (63

ПГ, 1998), Япония – 10250 (29 ПГ, 1995), Испания – 5544 (13 ПГ, 1995). Таким образом, количество заглушенных ТОТ на ВПГ из сплава 600МА превысило **125000** ТОТ. Это составляет в среднем около 300 ТОТ на ПГ.

Совершенно очевидно, что интенсивность глушений ТОТ из сплава 600МА на ВПГ существенно выше, чем на ГПГ. В США (и в любой другой стране) нет ни одного ВПГ с ТОТ из сплава 600МА, который можно было бы сравнить с ГПГ АЭС "Ловииза-1" (29 лет), КолАЭС-3, "Богунце-1" и "Ловииза-2" (25 лет) и некоторые другие, где количество заглушенных ТОТ на один ПГ в среднем менее 2 штук. Следует отметить, что с этими АЭС с ГПГ не выдерживают сравнения и ВПГ из сплава 600ТТ. В США всего 17 (девять – изначально и восемь – после замен) блоков используют 61 ПГ с ТОТ из этого сплава. В 2001 году на них уже было заглушено 1400 ТОТ, к началу 2005 года количество глушений достигло 1775 (причем отсутствуют данные по одному блоку и только для половины использованы данные ППР-2005). На 1 июня 2006 года эта цифра увеличилась до **1877**. Это 31 ТОТ на один ВПГ. Средний возраст этих ПГ равен 15,5 года.

Сравнение выдерживают только ПГ их сплава 690ТТ. На 1 июня 2006 – 395 ТОТ заглушено на 93 ПГ (данные по 61 из 93 ПГ). Но средний возраст этих ПГ – 6,2 года.

Однако следует иметь в виду, что для ГПГ США используются более жесткие критерии глушения ТОТ. Кроме того, большой вклад в глушение ТОТ (особенно в ПГ с ТОТ из сплавов 600ТТ и 690ТТ) вносит виброизнос.

Динамика глушений на большинстве ПГ США немонотонная. Это означает, что после некоторого периода стабильности возможен как резкий рост количества глушений, так и падение. В отличие от ГПГ, практически все ВПГ США с ТОТ из сплава 600 МА уже многие годы контролируются в 100% объеме, что позволяет без проблем сравнивать данные разных лет. Причины немонотонности динамики глушений, как правило, не обсуждаются. Сведений о применении какого-либо существенного управления деградацией ТОТ не имеется (если исключить шламоудаление и химические промывки). Причем это касается не только ПГ из сплава 600МА.

Ограниченный объем этого доклада не позволяет привести сравнительный анализ деградации ВПГ по фирмам-проектировщикам и по моделям ПГ. Тем не менее, заслуживает внимания тот факт, что из 38 ВПГ с экономайзерами с ТОТ из сплава 600 МА фирмы "Westinghouse" (модели "D3", "D4" и "E") максимального возраста в 17 лет достигнут 4 ПГ АЭС "Comanche Peak-1" в 2007 году, на который запланирована их замена. Средний возраст всех остальных – около 11 лет. В последующих моделях эта фирма отказалась от применения экономайзеров (модели "F" и "Δ75"). Кроме того, 16 ВПГ (этой же фирмы) с экономайзерами, имели ТОТ из сплава 600 ТТ. На этих 16 ПГ заглушено 783 ТОТ (На всех 61 ПГ с ТОТ из этого сплава – 1877). Только в этом году первые четыре ПГ этой модели достигнут 20-летнего возраста.

4. МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

Анализ показывает: фактически на ГПГ и ВПГ следует рассматривать только два (причем – общих) механизма образования дефектов. КРН и ЯК. Их действие несколько специфично из-за разных материалов ТОТ и весьма специфична их локализация – из-за принципиальных отличий конструкции.

Ниже проведено отдельное рассмотрение всех механизмы для 600МА и 08X18H10T.

На рис.3 приведена схема локализации механизмов образования дефектов на ТОТ ВПГ США, взятая из [7]. Красными рамками отмечены механизмы и локализации ГПГ

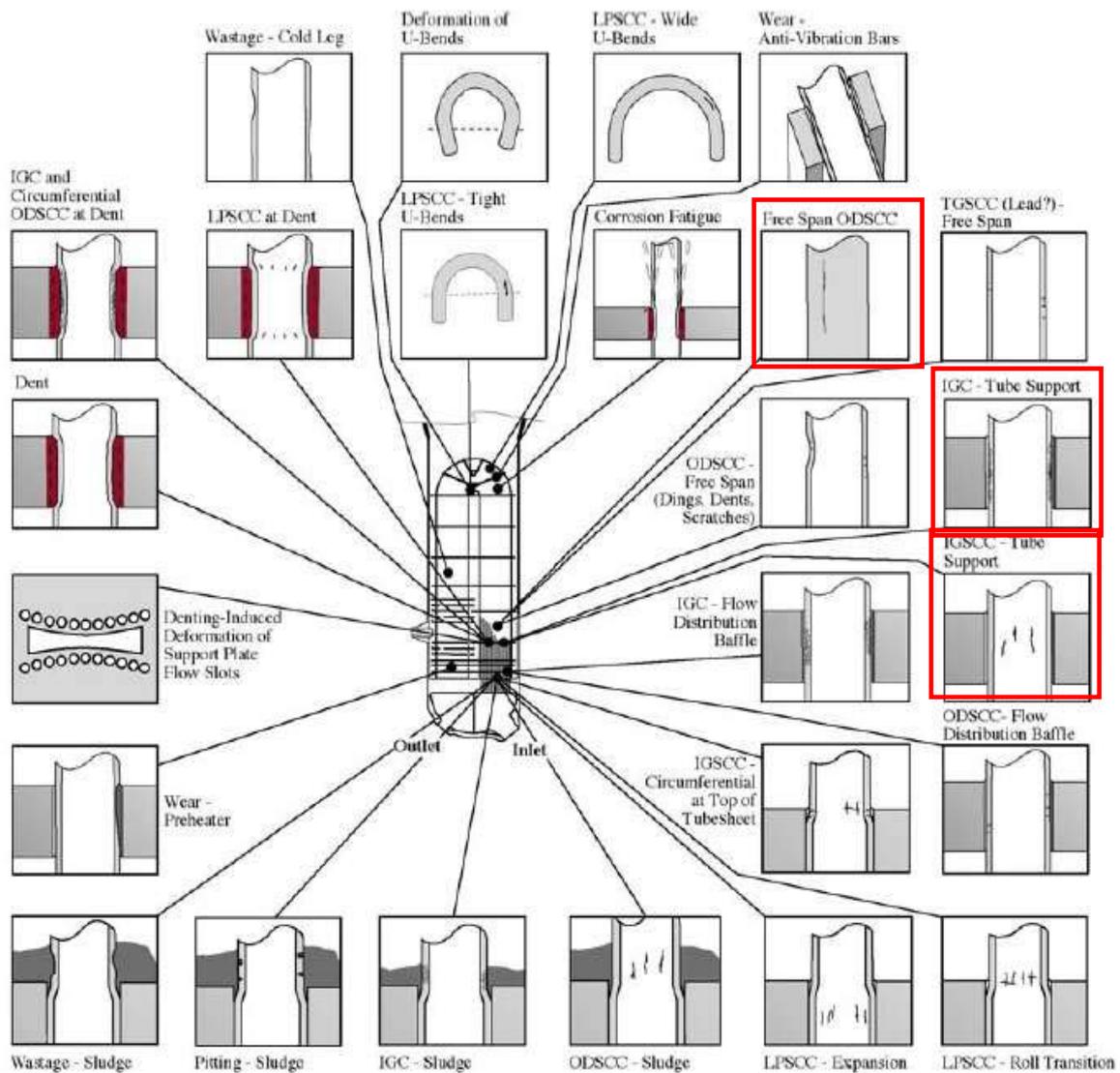


Рис.2 Механизмы образования дефектов и их локализация на ТОТ ВПГ [7].

4.1 КРН со стороны первого контура (в источниках США его называют по-разному: "IDSCC" "PWSCC" и "LPSCC") – занимает особое место в анализах специалистов США. Именно этот вид коррозии поражает помимо ТОТ ПГ (изнутри) еще и другое оборудование первого контура. На ПГ США этот вид коррозии впервые отмечен в начале 70-х годов. Его вклад в общее количество дефектов, потребовавших глушения, менялся во времени, достигая 40 %. Этот вид коррозии привел к разрыву ТОТ в 1976 году на АЭС США "Surry-2", в 2000 году – на "АЭС "Indian Point-2" (а также – в 1979 году на АЭС Doel-2 в Бельгии). На ТОТ ВПГ США этот механизм локализуется в нескольких местах (прежде всего - на гиах и в зоне заделки). В 1994 году в США на АЭС "Farley-2" были начаты эксперименты по добавлению цинка в воду первого контура для снижения интенсивности КРН. Затем в этот эксперимент включились еще несколько АЭС США и Германии. Наибольший опыт получен на АЭС "Diablo Canyon", где ввод цинка продолжался в течении трех циклов. В [16] сделан вывод о некотором снижении интенсивности КРН, но подчеркнуто, что результаты лабораторных исследований противоречивы. Этот вид КРН возможен в виде окружных трещин.

НА ГПГ дефекты со стороны первого контура встречаются крайне редко. На ПГВ-1000 не отмечено ни одного случая глушения по таким дефектам. На

ПГВ-440 такие дефекты привели к глушению нескольких ТОТ (менее 10). Отмечаются на нескольких блоках, причем не на всех ПГ. Явной локализации не отмечено. На гихах практически не встречаются.

4.2 КРН со стороны второго контура. В США также имеет несколько названий. Основное – "ODSCC", а также - "IGSCC" (IGA and ODSCC), "HPSCC". Впервые действие этого механизма отмечено на ВПГ США в начале 70 годов. Вклад - от 2% до 70%. В последние годы – главный механизм, приводящий к глушению ТОТ из сплава 600МА. Привел к трем разрывам ТОТ (1984 – АЭС "Fort Callhoun", 1989 - АЭС "McGuire-1", 1993 - АЭС "Palo Verde-2). Этот же вид коррозии привел к последнему – тринадцатому для ВПГ разрыву ТОТ на ПГ АЭС "Ulchin-4" в Южной Корее [9]. Этот разрыв заслуживает краткого описания. Характерных особенностей у этого разрыва было несколько. Во-первых, материал ТОТ этого ПГ – сплав 600ТТ. Во-вторых – он произошел на ПГ, эксплуатировавшемся менее трех лет (два года и четыре месяца). В-третьих – он произошел при плановом расхолаживании блока. В четвертых – дефект представлял собой комбинацию 75 мм осевой трещины и 10% окружной трещины, развившуюся в гильотинный обрыв ТОТ. В-пятых – разрыву не предшествовала течь. В-шестых – дефект располагался в 80 мм над трубной доской.

Большинство разрывов ТОТ ВПГ США имели место в первые годы эксплуатации ПГ. Некоторые данные приведены в таблице 3. В нее включены также и три разрыва, имевших место на ТОТ ВПГ за пределами США.

Таблица 3 Разрывы ТОТ на ВПГ

| Энергоблок | Дата пуска | Дата разрыва | Причина | Место | Величина течи, г/м | Время до разрыва, лет |
|--------------------|------------|--------------|---------|----------|--------------------|-----------------------|
| POINT BEACH - 1 | 1970 | 1975 | WASTAGE | Над ТД | 125 | < 5 |
| SURRY – 2 | 1972 | 1976 | PWSCC | гиб | 330 | < 4 |
| DOEL-2 | 1975 | 1979 | PWSCC | гиб | 135 | < 4 |
| PRAIRIE ISLAND - 1 | 1973 | 1979 | LP | Над ТД | 336 | < 5 |
| GINNA – 1 | 1970 | 1982 | LP | Над ТД | 760 | < 10 |
| FORT CALHOUN | 1974 | 1984 | ODSCC | Между ДЭ | 112 | < 10 |
| NORTH ANNA - 1 | 1978 | 1987 | FATIGUE | 7 ДЭ | 637 | < 9 |
| McGUIRE – 1 | 1981 | 1989 | ODSCC | Между ДЭ | 500 | < 8 |
| MIHAMA-2 | 1972 | 1991 | FATIGUE | 6 ДЭ | 500 | <19 |
| PALO VERDE – 2 | 1986 | 1993 | ODSCC | Между ДЭ | 240 | < 7 |
| INDIAN POINT – 2 | 1974 | 2000 | PWSCC | гиб | 150 | <26 |
| ULCHIN-4 | 1999 | 2002 | ODSCC | Между ДЭ | нд | <3 |

Пять из 13 разрывов произошли на ТОТ ПГ модели W44. Всего было изготовлено 29 ПГ этой модели. 23 были установлены в США, и на трех из них были разрывы. Два таких ПГ были на АЭС в Японии (МИНАМА-2), - один разрыв. По два ПГ было на двух блоках АЭС "Doel" в Бельгии. На блоке №2 был разрыв. А вот пущенный в 1974 году блок "Doel-1" после двух остановов в 1976 году из-за течей труб на каждом из ПГ, до сих пор эксплуатируется почти без дефектов. Эти два ПГ – последние за пределами США ВПГ с ТОТ из сплава 600МА.

Сведения о течах ТОТ являются важными свидетельствами состояния ТОТ ПГ.

Некоторые данные о течах ВПГ США до 1982 года приведены в [25]. За этот период было зафиксировано 140 течей, из которых 73 были менее 144 г/д, 35 течей находились в диапазоне 144-432 г/д, 28 течей были более 432 г/д и 4 течи

были течами при разрывах. Причиной 42 течей было КРН. Следующая по важности причина - общая коррозия была зафиксирована для 18 течей.

В таблице 4 приведены данные о крупных течах, которые были ниже допустимых пределов, но по которым персонал АЭС превентивно остановил блоки. Данные взяты в основном из [18], и представляют только период 1990-2000. Данные о течах после 2000 года (и с 1982 по 1990 год) взяты из официальных сообщений АЭС США. Допустимый предел в эти годы – 150 г/д.

Таблица 4 Крупные течи ТОТ ВПГ с превентивными остановами блоков

| Энергоблок | Дата пуска | Дата течи | Причина | Зона | Величина течи, г/д | Длительность эксплуатации до течи |
|------------------------|------------|-----------|---------|------------|--------------------|-----------------------------------|
| Indian Point – 3 | 1976 | 1988 | FAT | над ДЭ | 2880 | 13 |
| Beaver Valley – 2 | 1987 | 1989 | LP | между ДЭ | 500 | 2 |
| Saint Lucie-1 | 1977 | 1990 | LP | | 3 | 13 |
| Three Mile Island-1 | 1974 | 1990 | FAT | над ТД | 1440 | 16 |
| Milstone-2 | 1975 | 1990 | PLUG | | нд | 15 |
| North Anna-2 | 1980 | 1990 | PLUG | | 40 | 10 |
| Oconee-2 | 1974 | 1990 | FAT | | 130 | 16 |
| Shearon Harris | 1987 | 1990 | LP | | 50 | 3 |
| Maine Yankee | 1972 | 1990 | ODSCC | гиб | 1440 | 18 |
| San Onofre-1 | 1968 | 1991 | SLEEVE | | 150 | 23 |
| Milstone-2 | 1975 | 1991 апр | ODSCC | гиб | 70 | 16 |
| Milstone-2 | 1975 | 1991 май | ODSCC | над ТД | 70 | 16 |
| McGuire – 1 | 1981 | 1992 | ODSCC | между ДЭ | 250 | 11 |
| Arkansas – 2 | 1980 | 1992 | ODSCC | над ТД | 360 | 12 |
| Prairie Island-1 | 1973 | 1992, мар | ODSCC | над ТД, ПЗ | 144 | 19 |
| Prairie Island-1 | 1973 | 1992, сен | нд | | 187 | 19 |
| Trojan | 1976 | 1992 | SLEEVE | | 200 | 16 |
| Palo Verde-2 | 1986 | 1992 | ODSCC | между ДЭ | 240 | 6 |
| Kewanee | 1974 | 1992 | PLUG | | 100 | 18 |
| McGuire-1 | 1982 | 1992 | SLEEVE | | 185 | 10 |
| Braidwood – 1 | 1988 | 1993 | ODSCC | между ДЭ | 300 | 6 |
| San Onofre-3 | 1984 | 1993 | LP | | 50 | 9 |
| McGuire-1 | 1982 | 1993 | ODSCC | | 190 | 11 |
| McGuire-1 | 1982 | 1994 | SLEEVE | | 100 | 12 |
| Oconee-3 | 1974 | 1994 | FAT | | 144 | 20 |
| South Texas-1 | 1988 | 1994 | PLUG | | 160 | 6 |
| Zion-2 | 1974 | 1994 | ODSCC | в ТД | 1440 | 20 |
| Oconee-2 | 1974 | 1994 | FAT | | 144 | 20 |
| Main Yankee | 1972 | 1994 | PWSCC | | 50 | 22 |
| Zion-1 | 1973 | 1996 | LP | | нд | 23 |
| Byron-2- 600ТТ | 1987 | 1996 | LP | | 120 | 9 |
| Vogtle1 - 600ТТ | 1987 | 1996 | LP | | нд | 9 |
| Arkansas – 2 | 1980 | 1996 | ODSCC | | 65 | 16 |
| McGuire-2 | 1984 | 1997 | ODSCC | над ТД | 66 | 13 |
| Oconee-1 | 1973 | 1997 | PLUG | | 400 | 24 |
| Farly-1 | 1977 | 1998 | ODSCC | | 90 | 21 |
| Crystal River-3 | 1977 | 1999 | | | 7 | 22 |
| South Texas-2 | 1989 | 2000 | - | - | 35 | 11 |
| Commanche Peak 1 | 1990 | 2002 | ODSCC | гиб | 55 | 12 |
| Byron-2 – 600ТТ | 1987 | 2002 | | | 85 | 15 |
| Shearon Harris – 690ТТ | 2001 | 2004 | | | 8 | 3 |
| PaloVerde-2-690ТТ | 2003 | 2004 | | | 11 | 1 |
| Arkansas – 2 – 690ТТ | 2000 | 2004 | LP | в ТД | 35 | 4 |

Сравнение количества течей на ГПГ и ВПГ провести сложно по нескольким причинам. Во-первых, до 1995 года фактически все глушения на ГПГ проводились только по факту течи во время эксплуатации или - при проведении пневмоаквариумных и гидравлических испытаний. Разделить их пока не представляется возможным. Во-вторых, эксплуатационный предел течи на ГПГ был в эти годы в пятнадцать раз ниже, чем на ВПГ, и, течи, требовавшие останова блоков с ГПГ, на ВПГ могли и не фиксироваться. Действительно, более детальный анализ отчетов о контроле выявил многочисленные упоминания о малых течах в ВПГ США. В последние несколько лет на ГПГ количество течей не превышает нескольких течей в год. Более точные данные пока отсутствуют.

Общий вывод из обеих таблиц подтверждает, что основным механизмом, представляющим опасность для металла ТОТ, является КРН (большинство течей – КРН со стороны второго контура – ODSCC).

Этот вид коррозии локализуется на ТОТ ВПГ во многих зонах (на свободных пролетах, в зонах дистанционирования, в узлах заделки (несколько разных вариантов)). Узел заделки ТОТ в трубные доски оказался для ВПГ самым слабым местом. Именно на трубных досках скапливается шлам, поэтому в этой зоне – над трубными досками - прежде всего, образуются окружные трещины. Отмечались они многократно и в зазорах внутри трубной доски [24]. Это крайне опасный вариант КРН с наружной стороны ТОТ потребовал регулярного контроля этой зоны специальными зондами, поскольку проходные зонды этот тип дефекта не обнаруживают. Особенно опасны комбинации окружных трещин снаружи и изнутри ТОТ.

Многочисленные варианты вальцовки привели ко многим вариантам зазоров и переходных зон, которые подвергаются мощным коррозионным воздействиям. В США проверяют узел заделки специальными зондами на глубину до 100 мм, в последнее время рассматривается вопрос о контроле на глубину 17 дюймов (более 400 мм!).

Важно отметить, что на ВПГ большинство дефектов образуется в зонах дистанционирования, дефекты на свободных пролетах встречаются крайне редко (на отдельных ПГ отдельных АЭС). Тем не менее, случай на ТМ1-1 в 2001 году, когда один из дефектов на свободном пролете (заглушенной трубы!) привел к повреждению соседних ТОТ, привлек серьезное внимание NRC.

Проблемы, обусловленные горизонтальностью трубных досок, остаются и для ТОТ из новых сплавов. Как уже упоминалось выше, первые коррозионные повреждения на ПГ с ТОТ из сплава 600ТТ обнаружены именно в этой зоне.

На ГПГ КРН со стороны второго контура – тоже главный механизм образования дефектов, приводящих к глушению ТОТ. Реализуется по всей длине ТОТ. Максимальной интенсивности по высоте пучка достигает в зонах скопления шлама - в нижних рядах ТОТ. Как и на ВПГ США, максимум интенсивности образования дефектов по длине ТОТ на первых этапах деградации приходится на зоны максимального теплового потока. В дальнейшем из-за индивидуальной перестройки гидродинамики во втором контуре, связанной с накоплением отложений и шламов в межтрубном пространстве и выводом из процесса теплообмена массивов заглушенных ТОТ в нижних зонах пучка, интенсивность образования дефектов по длине ТОТ также становится индивидуальной для каждого ГПГ.

На ГПГ ни разу не отмечался самый опасный вариант действия КРН – окружные трещины.

На ГПГ практически отсутствуют дефекты (и крайне редко отмечаются даже индикации) в зонах заделки ТОТ в коллекторы. Вопрос о причинах этого заслуживает отдельного рассмотрения и выходит за рамки данной работы.

На ГПГ существуют все варианты соотношения дефектов, расположенных в зонах дистанционирования и на свободных пролетах. Эта ситуация исследуется и решение пока не найдено. Причем различие наблюдается даже в пределах одного блока на нескольких АЭС. Динамика такого отношения для одного парогенератора приведена на рис.3

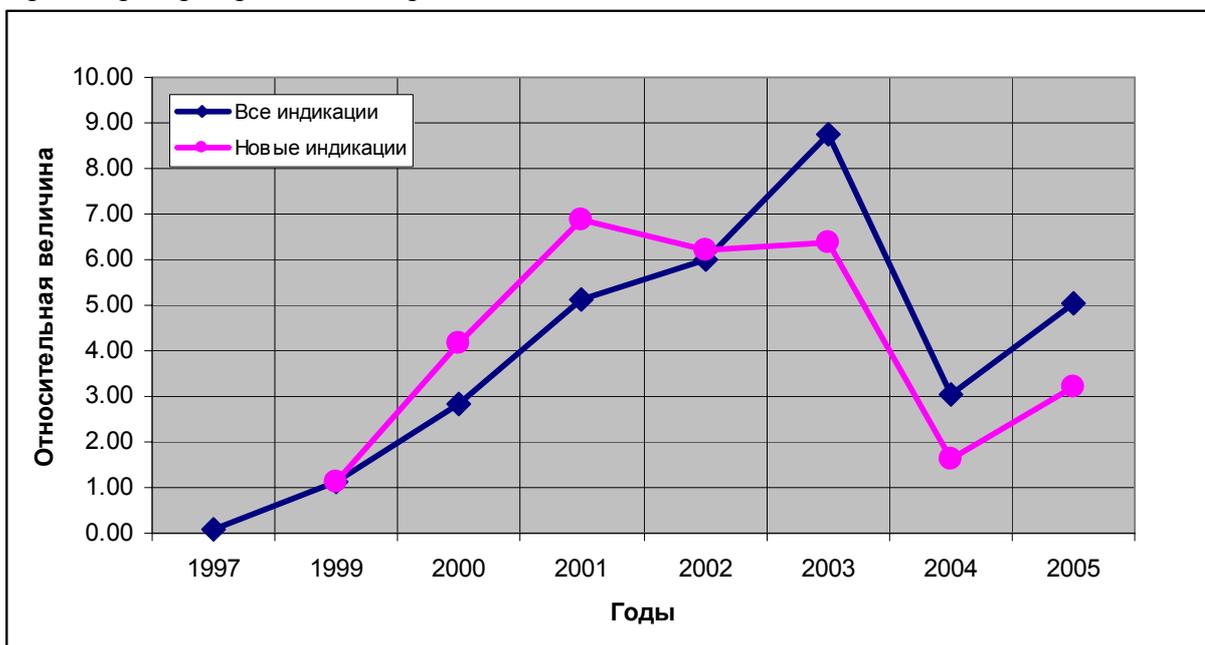


Рис.3 Отношение количества индикаций в зонах дистанционирования к количеству индикаций на свободных пролетах

Из приведенного графика очевидно, что динамика отношения количеств дефектов под ДЭ и на свободных пролетах для всех и новых дефектов коррелированы. Это означает, что процессы, определяющие такое соотношение в данном ПГ, продолжают существовать. Следует отметить, что после 2000 года доля новых индикаций в общем количестве индикаций составляет менее 10 % и не может быть причиной коррелированности.

На рис.4 приведен аналогичный график для другого ПГ этого же блока.

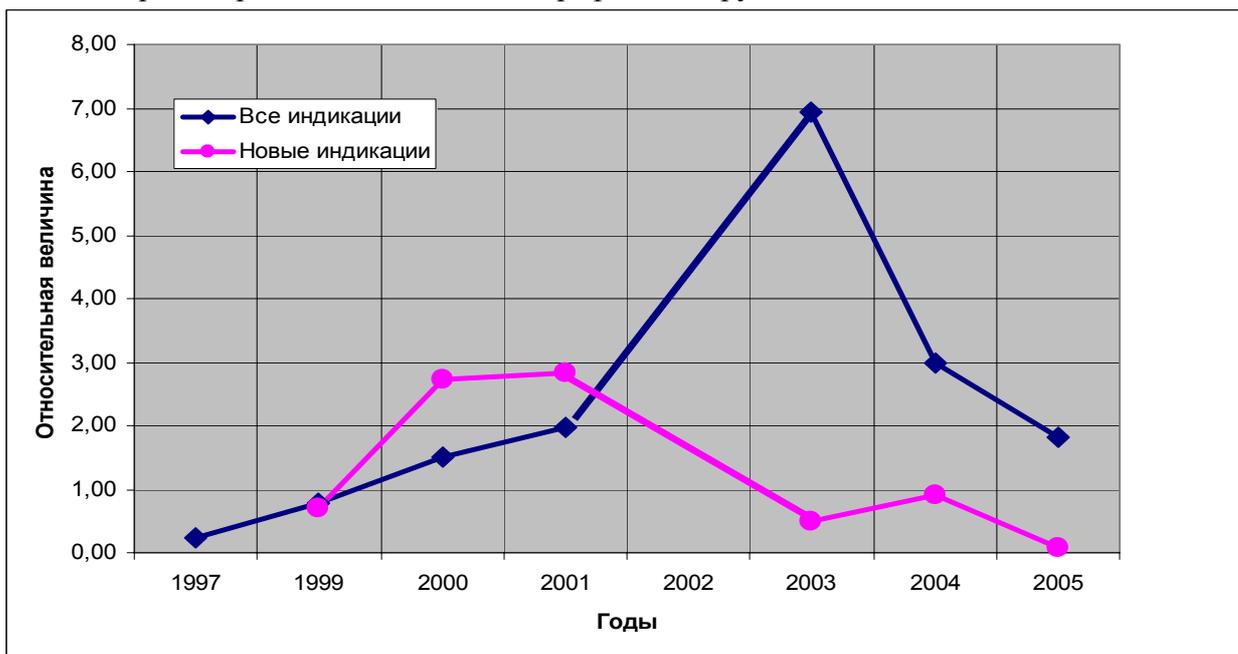


Рис.4 Отношение количества индикаций под ДЭ к количеству индикаций между ДЭ для ПГ1

Достаточно очевидно, что и величины рассматриваемых соотношений, и динамика этих соотношений, различны для разных ПГ одного блока.

В таблице 4 приведены величины этого соотношения для двух всех ПГ этой же АЭС и некоторых других ПГ различных АЭС с ПГВ-1000.

Таблица 4 - Динамика отношения количества дефектов под ДЭ и между ДЭ

| Блок, ПГ | Годы | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|------|--------|------|
| | 1997 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| АЭС1, 3ПГ1 | 0,24 | 0,78 | 1,50 | 1,97 | - | 6,94 | 3,0 |
| АЭС1, 3ПГ2 | 0,10 | 0,18 | 0,23 | 0,44 | - | 0,34 | 0,92 |
| АЭС1, 3ПГ3 | 0,08 | 0,30 | 0,44 | 0,84 | - | 1,21 | 0,90 |
| АЭС1, 3ПГ4 | 0,07 | 1,11 | 2,84 | 5,15 | 5,99 | 8,74 | 3,02 |
| АЭС2, 1ПГ2 | 0 | 0,09 | | 0,06 | - | - | 0,05 |
| АЭС2, 1ПГ4 | 0 | 0,11 | 0,09 | 0,07 | - | - | 0,06 |
| АЭС3, 2ПГ1 | - | - | 0,6 | 2,04 | - | замена | - |
| АЭС4, 3ПГ3 | 0,006 | 0,038 | 0,004 | 0,033 | - | - | - |

Как следует из таблицы, величина рассматриваемого соотношения для различных ПГВ-1000 может отличаться в десятки раз.

В таблице 5 приведены максимальные за все годы эксплуатации величины этого же соотношения для нескольких блоков с ПГВ-440

Таблица 5 Динамика отношения количества дефектов под ДЭ и между ДЭ

| Блок, ПГ | ПГ1 | ПГ2 | ПГ3 | ПГ4 | ПГ5 | ПГ6 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| АЭС1 | 1,6 | 0,39 | 0,46 | 0,05 | 0,14 | 0,17 |
| АЭС2 | 0,24 | 1,7 | 0,57 | 0,24 | 0,23 | 0,27 |
| АЭС3 | 0,03 | 0,16 | 1,7 | 0,26 | 0,11 | 1,4 |
| АЭС4 | 0,18 | 0,31 | 0,14 | 0,56 | 0,40 | 0,17 |

Анализ показал, что явных корреляций этого соотношения с состоянием ТОТ ПГ (например, таким параметром, как количество заглушенных ТОТ) не существует. В частности, ПГ1 и ПГ4 АЭС1, величина соотношения различается в 32 раза, а количество заглушенных ТОТ – 615 и 564 ТОТ – практически одинаково. Эти два ПГВ-440 самые старые из всех ПГВ-440 и всех ГПГ, и всех ПГ мира вообще. Они находятся в эксплуатации почти 35 лет.

Важно отметить еще одну закономерность. Индикации на свободных пролетах, как правило, сосредоточены в нижней части пучка – зоне скопления шлама ("Sludge pile"). Индикация в зонах дистанционирования могут располагаться где угодно – по всей высоте пучка. Имеется информация, что индикации и дефекты этого типа могут образоваться и в неэксплуатационных условиях!

Можно предположить, что дефекты, образующиеся под ДЭ, могут быть результатом действия некоторых дополнительных факторов, действующих по-разному на разные ПГ. Одним из таких факторов может быть свободный доступ кислорода в объем второго контура в ГПГ в некоторых стояночных режимах. Вопрос коррозии в стояночных режимах, а также в режимах пуска и останова заслуживает отдельного рассмотрения.

Кажется очевидным, что решение этой проблемы может дать ключ к пониманию механизмов и причин образования дефектов на ТОТ. Исследование влияния ориентации теплообменных поверхностей и дистанционирующих элементов на реализацию механизмов образования дефектов (то есть - сравнения

данных ГПГ и ВПГ с ТОТ из сплава 600МА) может иметь большое значение для достижения этой цели. Не меньшее значение имели бы исследования вырезанных из ГПГ ТОТ, но эти дорогостоящие операции осуществляются на ГПГ крайне редко.

4.3 Вклад язвенной коррозии и ее частного случая - питтинговой коррозии ("pitting") никогда не превышал на ВПГ 10%, а в последние годы он уменьшился до величины порядка 1% и практически не рассматривается в США как опасный механизм. По данным /8/, хотя ряд АЭС и глушил ТОТ по причине питтинга, но это, как правило, было связано с серьезными нарушениями водно-химического режима. Там же отмечено, что многие АЭС сообщали, что глубина дефектов, причиной образования которых была питтинговая коррозия, "не превышала 15% толщины стенки" /8/.

Имеющиеся данные по ГПГ дают основания утверждать, что это типично и для ГПГ. Однако роль питтинга на ГПГ выше, чем на ВПГ. Есть основания полагать, что питтинг комбинируется с КРН. Трещины КРН начинаются из питтингов, затем эти трещины подвергаются питтинговой коррозии и так далее. Можно предположить, что питтинговая коррозия реализуется не одновременно с КРН, а в периоды грубых нарушений ВХР, а также в периоды пуска, стоянки и останова. Тем не менее, сама по себе язвенная коррозия для ГПГ (как и для ВПГ), серьезной опасности не представляет.

В [21] рассмотрен вопрос о возможности комбинирования КРН и питтинга. Упомянут ряд экспериментальных исследований, подтверждающих такую возможность на ТОТ ВПГ. О возможности коррозионных процессов в период пуска, стоянки и останова публикаций становится все больше, например [22,23]. Поэтому заслуживает внимания гипотеза о том, что, по крайней мере, на ГПГ именно в эти периоды максимальной интенсивности может достигнуть питтинг, причем, прежде всего – в зонах дистанционирования.

4.4. Таким образом, сравнение показывает, что наиболее опасный механизм деградации ТОТ – КРН со стороны второго контура - сходным образом реализуется на ГПГ и ВПГ, несмотря на принципиальное отличие путей КРН: транскристаллитный на ГПГ и межкристаллитный – на ВПГ.

Все многочисленные варианты локализации этого механизма на ВПГ являются результатом выбранных для ВПГ конструктивных решений.

4.5 Именно результатом выбора конструкции и водного режима (не материала!) является значительный вклад в образование дефектов таких специфических для ВПГ механизмов как виброизнос ("wear", "fretting" – один разрыв ТОТ), повреждение ТОТ посторонними предметами ("foreign objects" ("loose parts")) - три разрыва ТОТ. На АЭС "Prairie Island-1" – это была пружина длиной 216 мм и диаметром 32 мм, отвалившаяся от устройства по удалению шлама. Вообще в ВПГ США находят множество мелких объектов. Поиску и удалению этих объектов присвоено даже специальное сокращение - FOSAR. Кроме того, имеет место также многоцикловая усталость ("High-cycle Fatigue" – два разрыва ТОТ) и утонение (общая коррозия) ("wastage" – один разрыв ТОТ). Интенсивную общую коррозию специалисты США [8] связывают с применением фосфатного водного режима в первые годы эксплуатации ПГ.

Подтверждением этому служит тот факт, что на замененных ПГ из сплавов 600ТТ и 690ТТ продолжается глушение труб из-за виброизноса в зонах дистанционирования (главным образом – на гибовых участках) и за счет попадания посторонних предметов. Как уже отмечалось выше, только на 61 ПГ

(17 блоков) США уже заглушено более 1884 ТОТ, а в Японии, где всего 20 ПГ (на 7 блоках) с ТОТ из сплава 600ТТ только в 2003-2004 году на 13 ПГ ("Sendai-1", "Sendai-2", "Takahama-2", "Tsuruga-2") заглушено 1504 ТОТ (т.е более 100 ТОТ на ВПГ за один контроль). Средний возраст этих ПГ был в 2005 году равен 18,4 года. В Южной Корее к началу 2002 года на 28 ПГ (11 блоков) с ТОТ из 600ТТ было заглушено 1040 ТОТ (37 ТОТ на ПГ). Средний возраст корейских ПГ в 2002 году был 11,8 года.

На ГПГ все эти механизмы повреждения ТОТ не отмечались.

4.6 Рассматривая расположение дефектов по длине ТОТ, легко увидеть, что большая часть дефектов на ТОТ ПГ США располагается на горячей стороне ПГ – так же как и на горизонтальных ПГ. Подавляющее большинство дефектов вертикальных ПГ располагаются в зоне дистанционирующих решеток (почти на половине горизонтальных ПГ – та же картина).

Однако дефекты в зоне вальцовки, внутри трубной доски, в зоне выхода ТОТ из трубной доски, типичные для всех вертикальных ПГ, на горизонтальных ПГ встречаются редко и никогда не были причиной каких-либо инцидентов. Можно предположить, что такова "плата" за горизонтальность трубной доски в ВПГ. Но по данным [1], проблемы с дефектами в зонах заделки ТОТ в трубные доски были и на ранних проектах с вертикальными трубными досками и ТОТ из аналога нашей нержавеющей стали. Видимо, играет определенную роль конструктивное решение этого узла, и технология производства. Следует отметить, что на ГПГ в связи с решением проблемы коллекторов было принято решение о довальцовке кольцевых щелевых зазоров на выходе ТОТ из коллекторов (на вновь вводимых в эксплуатацию ПГ). При выполнении этой операции зазоры полностью ликвидировать не удавалось. Вместо 0,1-0,3 мм он становился на порядок меньше. Тем не менее, никаких проблем в этой зоне на ПГ, не прошедших довальцовку и прошедших ее – не было, и нет.

Фактические данные таковы.

Ни на одном ПГВ-1000 нет дефектов и каких-либо индикаций внутри трубных досок (коллекторов).

На ПГВ-440 отмечалось несколько десятков индикаций разных типов, но ни в одном случае не было признано необходимым глушение ТОТ по этим индикациям.

Особенностью горизонтальных ПГ является обнаружение на многих ПГ большого количества глубоких и опасных дефектов между ДЭ - на свободных пролетах [26]. Причем концентрируются они, как показывает анализ, в зонах максимальной загрязненности и скопления шлама. В каком то смысле дефекты ТОТ ГПГ на свободных пролетах являются аналогами дефектов над трубными досками в ВПГ и в зонах дистанционирования – в местах, где на ВПГ концентрируется шлам и образуются отложения.

Второй зоне образования дефектов на ГПГ (под ДЭ) некоторым аналогом могут быть неконцентричные щелевые зазоры в зонах дистанционирования ВПГ и щелевые зазоры в зоне заделок ТОТ в трубные доски ГПГ. Именно в них за счет капиллярных сил (зоны дистанционирования) и гравитационных сил (зоны заделки) может удерживаться жидкость в стояночных режимах. Большое внимание, уделяемое в США (и других странах, эксплуатирующих ВПГ) коррозии в щелевых зазорах и все больший интерес к программам исследования коррозии в периоды пуска, стоянки и останова блока, подтверждают это предположение.

5. МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ТОТ

Основой методологии обеспечения целостности ТОТ в ВПГ является жесткая регламентация всех работ на всех этапах жизненного цикла ПГ. Не менее жесток и контроль выполнения требований всех нормативных документов со стороны регулирующих органов. Работа регулирующих органов идет под постоянным и широким общественным контролем.

Значительные ресурсы выделяются на проведение исследований по возникающим и перспективным направлениям исследований.

В исследованиях значительна роль фирм – проектировщиков и изготовителей ПГ, которые вынуждены в той или иной степени компенсировать фирмам - владельцам АЭС понесенные из-за повреждений ВПГ потери. Большинство судебных исков по компенсации таких потерь (прежде всего к фирме Westinghouse) были отозваны после соглашений между истцами и ответчиками.

Многие проблемы целостности ТОТ ВПГ были решены. Причины многих явлений, обнаруженных в ВПГ США были выявлены и устранены, иногда - после глубоких специальных исследований. Значительная часть проблем решалась методом проб и ошибок.

На ВПГ с ТОТ из сплава 600МА речь не могла идти о достижении проектного ресурса. Большинство ВПГ "дотягивали" до поступления новых ПГ для замены. Тем не менее, следует констатировать, что ряд проблем все-таки был решен:

Решена проблема интенсивной общей коррозии, связывавшейся с отмененным фосфатным ВХР.

Решена проблема интенсивного питтинга.

Решена проблема дентинга.

Близка к решению проблема дефектов под ДЭ – щелевая коррозия в особых условиях.

Детально исследована коррозия со стороны первого контура и уже несколько лет на действующих АЭС отрабатывается технология ее радикального снижения.

Проблема выявления окружных трещин и дефектов в зоне заделки привела к созданию различных типов специальных зондов.

Для повышения качества анализа данных ВТК для выполнения этой операции привлекаются несколько команд аналитиков численностью до 50 человек, начато использование автоматизированных систем дешифровки ВТК-сигналов. Дешифровка ведется дистанционно.

Разработан и применяется целый спектр корректирующих мероприятий, большинство из которых отражают специфику ВПГ.

На ГПГ в принципе используются те же мероприятия, но нормативная база на порядок меньше, роль регулирующего органа существенно ниже.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВПГ

6.1 Нормативная база

Большое количество нормативных документов, созданных в США, положены в основу нормативных документов большинства стран, создающих и эксплуатирующих ВПГ. Некоторые из них уже используются при создании нормативных документов для ГПГ. Тем не менее, есть еще ряд проблемных вопросов, которые не нашли отражения в российских нормативных документах. При их создании следует учитывать опыт США. Это касается, прежде всего, нормативной базы ВТК, постоянной корректировки инструкций по эксплуатации и некоторых других вопросов.

6.1 Контроль ТОТ

Большое количество проблем с ТОТ и жесткий общественный контроль за безопасностью РУ. В США огромный общественный интерес к проблемам безопасности АЭС вызвали две аварии последних лет: разрыв ТОТ на ВПГ АЭС "Indian Point-2" в 2000 году и огромное коррозионное повреждение крышки реактора на АЭС "Davis Besse" в 2002 году. Это привело к созданию многих типов зондов, вихретоковых приборов, систем обработки данных (в том числе – дистанционных). Сформировались, прошли обучение и получили большой практический опыт коллективы аналитиков ВТК. В обработке результатов контроля в США иногда участвуют до 50 специалистов (до 20 аналитиков высшей квалификации), из которых формируются не менее двух независимых групп. Для сравнения – в России менее 10 аналитиков высшей квалификации. Работа аналитиков в США регламентируется соответствующими нормативными документами. Некоторых важных типов документов в России не существует. Работа хотя бы двумя независимыми группами не ведется. В США всякая ТОТ, в которой была зафиксирована крупная течь, или дефект (если он был зафиксирован другим методом контроля), в обязательном порядке подвергается вихретоковому контролю всеми типами датчиков, видеоосмотру и гидравлическому испытанию (отдельно данная ТОТ). Это позволяет получить детальную информацию о механизме образования дефекта, его местонахождении и размерах. В некоторых случаях эта ТОТ вырезается для дальнейших исследований. В России в большинстве случаев такие ТОТ просто глушатся. В США нормативно определена необходимость индивидуальных гидроиспытаний ТОТ с подозрительными и крупными дефектами.

Гидравлические испытания отдельных ТОТ стали нормой для ВПГ. Разработаны соответствующие нормативные документы и технические средства, позволяющие без больших затрат времени проводить такие испытания.

Кроме того, в США в программу контроля всегда входят значительные объемы контроля вращающимися и другими зондами для локального контроля индикаций, выявленных проходными зондами. Это позволяет определить длины дефектов и механизмы их образования. В отчетах АЭС США всегда присутствует таблица с перечнем механизмов образования дефектов и количеств индикаций по каждому механизму, а также анализ всех обнаруженных механизмов.

6.2 Объемы и периодичность контроля

Для ВПГ разработана простая и не допускающая толкований документация по периодичности и объемам контроля для каждого типа ПГ. Практически все ВПГ из сплава 600МА ведут контроль ТОТ каждый цикл (цикл – это либо 18, либо 24 месяца). Давно стало обычным для многих АЭС с активно деградирующими ТОТ в ВПГ проводить контроли ежегодно, и даже ежеквартально! Нет оснований полагать, что необходимость остановов блоков

только для проведения ВТК ТОТ ПГ вызывает положительные эмоции у фирм-владельцев и персонала АЭС, однако это делается. На 10 АЭС США были разрывы ТОТ, и персонал этих АЭС на практике знает, сколь важны эти процедуры контроля. Нельзя не отметить, что в документах АЭС США (прежде всего – недавно заменивших ПГ), касающихся изменения технических спецификаций, отмечается, что большая периодичность контроля для новых ПГ, устанавливаемая NRC, вызывает протесты! Специалистам, многие годы осуществлявшим как минимум ежегодный контроль ТОТ ПГ, трудно смириться с мыслью, что можно многие годы (до шести лет!) не контролировать состояние ТОТ. Они намерены контролировать чаще.

До последнего времени объемы и периодичность контроля ПГ в России были слабо регламентированы. В 2005 году разработан руководящий документ, регламентирующий эти вопросы, но он еще не вступил в действие и не свободен от недостатков. Некоторые АЭС России продолжают контролировать ПГ в несоответствующих состоянии этих ПГ объемах и с большой периодичностью. Трудно представить себе АЭС США, проводящую контроль в объеме 150 ТОТ. Или АЭС, с момента пуска ПГ, проконтролировавшею менее половины всех ТОТ (за 20 лет). Такое возможно только на ГПП. Естественное для АЭС (или фирм-владельцев АЭС в США) желание минимизировать сроки и стоимость контроля (характерное, как показывает анализ, и для АЭС США) должно ограничиваться жесткой многоуровневой регламентацией. Такой опыт в США имеется.

6.3 Ремонт и глушение ТОТ.

В США многие годы определение "ремонт" ("repair") ТОТ распространяется на несколько операций собственно ремонта (довальцовка, ремонт заглушек, замена заглушек, установка ремонтных втулок и т.п.) и на глушение ТОТ ("plugging"). Любопытно отметить, что все эти годы идет спор между большинством АЭС и регулирующим органом США (NRC) о правильности этого термина. Тезис АЭС "глушение не ремонт" ("plugging not repair") встречает жесткую позицию NRC, отстаивающей статус-кво.

Использование закрепляемых с внутренней стороны ТОТ под обнаруженным дефектом ремонтных втулок ("sleeve") – традиционная практика на ВПП США с ТОТ из сплава 600МА. Анализ различных технологий, эффективности, статистики и т. п. – отдельная большая тема, выходящая за рамки данной работы. Есть достаточно оснований считать, что для ГПП этот опыт использовать не стоит. Количество проблем, дополнительно возникающих при применении этой технологии, сводит почти к нулю эффект ее применения, хотя в последние годы качество установки втулок заметно повысилось. Некоторые АЭС США отказались от применения втулок. Уже много лет втулки не используются на ПГ Франции. Многие импортируемые в США новые ПГ не предусматривают применение этой технологии.

Статистика по количеству втулок на эксплуатирующихся блоках АЭС с ТОТ из сплава 600МА еще окончательно не обработана. На замененных ПГ США количество втулок достигало нескольких тысяч. Например, на трех замененных в 1993 году ПГ АЭС "Milestone-2" было 5164 втулки [8]. Можно пока точно сказать, что на двух АЭС втулки не используются, а общее количество втулок на ВПП США более 56000. Особый интерес представляет практика АЭС "Comanche Peak-1". Таблица истории глушений ТОТ ПГ этой АЭС приведена ниже. Два последних контроля завершились отрицательными количествами глушений! Из примечаний к таблице ясно, как такое могло произойти. На ПГ этого блока глушат ТОТ с новыми дефектами, а часть ранее заглушенных ТОТ разглушивают и ставят втулки! Логика такого решения в принципе понятна, однако применяет ее АЭС,

где заглушено менее 3% ТОТ. В тоже время АЭС "St.Lucie-2", которая вынуждена снижать мощность РУ из-за большого количества глушений (почти по 2000 заглушенных труб на каждом ПП), - втулки вообще не использует.

Таблица 5 История глушений АЭС "Comanche Peak-1" [12].

Unit 1 Tube Plugging by Refuel Outage

| Cycle | EFPY | SG 1 | SG 2 | SG 3 | SG 4 | Total |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Pre Service | 0 | 14 | 4 | 5 | 11 | 34 |
| 1RF01 | 0.9155 | -2 | -1 | 0 | 0 | -3 |
| 1RF02 | 1.6859 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1RF03 | 2.4164 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1RF04 | 3.5876 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| 1RF05 | 4.9304 | 0 | 11 | 2 | 6 | 19 |
| 1RF06 | 6.2436 | 0 | 67 | 8 | 27 | 102 |
| 1RF07 | 7.6410 | 8 | 20 | 35 | 57 | 120 |
| 1RF08 | 9.0271 | 11 | 58 | 85 | 55 | 209 |
| 1RF09 | 10.4194 | 48 | -7 (1) | -11 (2) | -17 (3) | 13 |
| 1RF10 | 11.6909 | -15 (4) | -61 (5) | -15 (6) | -24 (7) | -115 |
| Total Effective Tubes | | 64 | 92 | 110 | 115 | 381 |
| Total % per SG | | 1.40% | 2.01% | 2.40% | 2.51% | 2.08% |

NOTES:

- (1) 18 tubes plugged, 33 tubes deplugged and 213 tubes sleeved (LTS)
- (2) 22 tubes plugged, 42 tubes deplugged and 250 tubes sleeved (LTS)
- (3) 12 tubes plugged, 39 tubes deplugged and 273 tubes sleeved (LTS)
- (4) 14 tubes plugged, 32 tubes deplugged and 78 tubes sleeved (LLS)
- (5) 33 tubes plugged, 100 tubes deplugged and 180 tubes sleeved (LLS) (less 14 LTS sleeved tubes plugged)
- (6) 47 tubes plugged, 66 tubes deplugged and 145 tubes sleeved (LLS) (less 27 LTS sleeved tubes plugged)
- (7) 43 tubes plugged, 72 tubes deplugged and 144 tubes sleeved (LLS) (less 19 LTS sleeved tubes plugged)
- (8) Hydraulic Equivalence of Leak Tight Sleeves (LTS) = 28.3:1 and Leak Limiting Sleeves (LLS) = 27.5:1

В США для ВПП с ТОТ из сплава 600МА используется нормативный критерий глушения 40% толщины стенки, базирующийся на измерениях фазы сигнала от проходных вихретоковых зондов и основанный на учете возможного роста дефекта, погрешности измерения глубины и нормативном запасе. Однако, наряду с ним, широко используется альтернативный "вольтовый" (амплитудный) критерий. Он базируется на прямых гидравлических испытаниях ТОТ с дефектами и разрывных испытаниях вырезанных ТОТ с дефектами. Имеется и постоянно пополняется база данных для использования амплитудного критерия. При использовании амплитудного критерия АЭС получает право игнорировать глубинный критерий. На ПП АЭС США, использующих амплитудные критерии, нормативно разрешена эксплуатация ТОТ с дефектами глубиной 100%, если они (дефекты) удовлетворяют амплитудному критерию! Этот подход заслуживает серьезного внимания

Критерии глушения, выработанные таким предельно простым "лобовым" подходом, позволят значительно снизить количество глушений на ПП. Однако, для ВПП с ТОТ из сплавов 600ТТ и 690ТТ продолжает использоваться глубинный критерий "40%".

Скорости роста глубин дефектов на ВПП в основном сравнимы со скоростями роста на ПП. Среднее значение скорости роста глубины дефектов, как правило, не превышает 10% в год. Однако на некоторых АЭС отмечены

скорости роста до 50% в год. Основное внимание на АЭС США уделяют скоростям роста амплитуд ВТК-сигналов от дефектов. Логика этого подхода очевидна – амплитуды сигналов пропорциональны объему дефектов. Сравнение амплитудных характеристик дефектов на ТОТ ВПГ и ГПГ практически невозможно из-за различных градуировок проходных зондов. Информации по скорости роста глубины мало. Отмечаются в США и отрицательные скорости роста, как глубин, так и амплитуд.

6.4 Исследования

Негативный опыт с ТОТ из сплава 600МА стимулировал формирование в США большого количества фирм, коллективов в национальных лабораториях и университетах, сосредоточившихся на исследования в области именно "парогенераторных" направлений в исследовании коррозии, теплогидравлики, химии. Количество публикаций огромно, в них можно отыскать немало полезного для разработчиков и исследователей ГПГ. В этих публикациях можно встретить почти готовые ответы на некоторые вопросы.

Предложено и реализовано много различных прикладных исследований. Несомненный интерес представляют (особенно при рассмотрении в историческом развитии) исследования в области водного режима второго и первого (PWSCC!) контуров. Крайне интересны коррозионные исследования, результаты некоторых из них использованы в данной работе. О результатах многих исследований можно судить по изменениям конструкции ПГ (изменение типа дистанционирования и материала дистанционирующих элементов – результат глубоких исследований коррозии в щелях). Обращение многих АЭС США к французским и германским фирмам для проведения химических промывок при наличии технологии EPRI, видимо свидетельствует не в пользу этой технологии.

Не могут не быть интересны исследования и решения по коррозии в режимах пуска, стоянки и останова, а также по консервации ВПГ. Это направление исследований находится пока еще в начальной стадии, но многие результаты могут быть использованы для ГПГ.

В США тщательно отработана технология вырезки ТОТ и их комплексного исследования (металлографические исследования только часть комплекса). В этой области всю методологию можно просто копировать. Одной из причин применения сравнительного анализа, проведенного в данной работе, явилось отсутствие достаточно количества качественной информации по исследованию дефектов вырезанных с ТОТ ГПГ. Результаты металлографических исследований ТОТ ВПГ США отчасти возмещают нехватку собственных данных.

Большой интерес представляют исследования, посвященные прогнозированию деградиационных процессов в ГПГ и, прежде всего – "ранних аварий". Аналогичных исследований для ГПГ практически нет.

6.5 Проблемы

На ВПГ США (и других стран) отмечается различие процессов деградации ТОТ ПГ между разными АЭС и даже разными ПГ на одном блоке. Это одна из ключевых проблем, решение которой необходимо для понимания факторов, определяющих процесс деградации ТОТ. Она не решена ни для ВПГ, ни для ГПГ.

На ВПГ еще в первые годы эксплуатации ПГ с ТОТ из сплава 600МА обратили внимание на то, что дефекты располагаются на горячей части пучка. В технических спецификациях некоторых АЭС ограничили объем контроля только этой частью пучка. Появление больших количеств дефектов на холодной стороне пучков некоторых ПГ стало неожиданностью. Это явление нетипичное и точного объяснения не получило. Аналогичная проблема имеет место и на ГПГ.

Проблема "ранних аварий" является крайне острой. Ряд ВПГ достаточно благополучно эксплуатируются десятилетиями (регулярно проводя контроли и проводя глушения ТОТ с дефектами), а на некоторых, как уже излагалось выше, разрывы ТОТ происходят еще до первого контроля. В этом самом остром варианте эта проблема для ГПГ не существует. Но если ее рассмотреть шире – включив в нее, кроме разрывов и интенсивную деградацию ТОТ, следует констатировать, что решение ее не найдено ни для ВПГ, ни для ГПГ. Ранняя интенсивная деградация ТОТ стала причиной всех шести замен ГПГ, и очень многих замен ВПГ.

Проблема возможности разрушения нескольких ТОТ очень серьезно исследуется в США. До сегодняшнего дня эта проблема рассматривается только в теоретическом плане. Однако для ВПГ она, судя по многочисленным исследованиям и фактам, достаточно остра. На ВПГ возможность разрыва нескольких ТОТ одновременно в нескольких случаях могла реализоваться, но - обошлось.

В США уделяется внимание и возможности вырыва ТОТ из трубных досок. Разработана методология, существенно снижающая возможность реализации такой ситуации.

6.6 Специфические проблемы и решения для ВПГ

Большое количество зон локализаций дефектов в ВПГ потребовало разработки и применения специальных зондов для контроля заглушек, втулок, зон внутри трубной доски, в зонах вальцовки и переходных зонах. Все эти зоны контролируются локально, после контроля проходными зондами. Все это резко увеличивает объемы и длительность контроля, а также нагрузку на аналитиков. Однако и эту проблему решают путем применения автоматизированных систем дешифровки, дистанционной обработки, увеличением количества аналитиков.

Высокие скорости движения теплоносителя второго контура, приводящие к виброизносу, привели к необходимости решать проблему контроля дефектов в заглушенных ТОТ! Выросшие на заглушенной ТОТ дефекты приводили несколько раз к образованию кольцевой трещины, после чего разломившаяся ТОТ начинала повреждать соседние ТОТ. После нескольких таких случаев все глушения ТОТ производятся только после стабилизации ТОТ вставляемым внутрь ТОТ стержнем.

Течи на ГПГ США, как было показано выше, достаточно частое явление. Сам допустимый предел течи – 150 гал/день – около 25 л/час – в пять раз выше аналогичного предела для ГПГ (ранее этот предел составлял от 500 до 720 гал/день!). В настоящее время все АЭС США принимают участие в обсуждении нового предела течи – 75 гал/день. Как и в России, системы непрерывного мониторинга течей (без взятия проб) имеются не на всех АЭС США.

Из-за высокой активности деградации на нескольких блоках с ВПГ США проводились и проводятся остановы блоков только для контроля ТОТ ("mid-cycle inspections"), что существенно снижает экономические показатели этих блоков. В последние годы перед заменой ПГ (1982 год) на АЭС "Turkey Point-4" контроли проводились через пять, а затем и через 3,5 месяца.

Эффект "Обригхайм" (диодный эффект). Суть этого эффекта состоит в том, что попадающая в заглушенные ранее ТОТ вода вызывает распухание (swelling), а в некоторых случаях и разрыв ТОТ и повреждение соседних ТОТ. Он был впервые отмечен в 1973 году на АЭС "Obriheim" в Германии, затем – в 1984 году на АЭС "Ringhals-2" (разрыв заглушенной ТОТ!) в Швеции. В начале 90-х годов он отмечался на французских АЭС "Dampierre-2" (1992- разрыв) и "Tricastin-1" (1993-разрыв). В 1995 году эффект был обнаружен на двух АЭС в США (Haddam Neck, Connecticut Yankee), в 2000 году – на АЭС IP2 (разрыв), в

2001 году на TMI-1 (обрыв четырех ТОТ и повреждение соседних) и "Oconee-3". По данным отчета EPRI [28], еще в нескольких случаях в США этот эффект приводил к разрыву заглушенных ТОТ (1991- "Salem-1 и др.).

Появилась и обсуждается проблема обезвоживания ТОТ перед глушением.

Поэтому достаточно рутинной процедурой стало в США разглушивание труб для контроля самих труб, стабилизаторов и удаления воды.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЦЕЛОСТНОСТИ ТОТ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПГ.

Пути решения этой проблемы для ГПГ достаточно очевидны и многократно формулировались в различных публикациях, например в [27]. Самое главное, что история эксплуатации ГПГ дает реальные примеры практического функционирования парогенераторов фактически без дефектов на ТОТ.

Что касается ВПГ, то для ВПГ с ТОТ из сплава 600МА проблема эта решена не была. Есть основания предполагать, что очень большая работа предстоит на ВПГ из сплава 600ТТ, а для заявлений о полном решении коррозионных проблем для ТОТ из сплава 690ТТ, ставшего основным материалом ВПГ с 1988 года, как уже упоминалось выше, прошло слишком мало времени. Проблемы же механического износа (за счет вибрации и посторонних предметов), как показывает опыт эксплуатации ВПГ, окончательно решить не удастся. Особенно ярко это подтвердила ситуация на АЭС "Oconee", уже упоминавшаяся выше. Все три блока этой АЭС заменили ПГ с ТОТ из сплава 600 МА на ПГ с ТОТ из сплава 690ТТ, и уже в первые годы эксплуатации имеют проблемы с массовым виброизносом, причем не традиционным (на гибовых дистанционирующих элементах), а на ДЭ прямых участков ТОТ.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный краткий анализ показал, что рассмотрение подходов к решению проблемы обеспечения целостности ТОТ на вертикальных ПГ, несмотря на, казалось бы, принципиальные отличия конструкций и материалов является исключительно важным, для понимания и решения этой же проблемы на ГПГ.

Огромный объем фактических данных, теоретических и экспериментальных исследований может быть при внимательном подходе использован для ГПГ.

Эволюция конструкторских решений и решений по выбору материала ВПГ, эволюция нормативной базы, систем контроля, систем анализа данных, систем принятия решений и многое другое – весь этот стоивший больших затрат опыт может и должен быть использован для решения проблем действующих ГПГ и учтен при создании новых проектов.

Особенно важен опыт США по применению новых материалов. Замена материала - очень ответственное решение. И последствия таких решений иногда проявляют себя через 10 и даже 20 и более лет. Опыт применения в ГПГ нержавеющей стали насчитывает уже 35 лет. Приведенные примеры показывают, что при уже хорошо известных условиях ГПГ способны эксплуатироваться практически без дефектов.

У ГПГ типа ПГВ-1000 имеются большие резервы для совершенствования без принципиальных изменений конструкции.

Поскольку с 1999 года в США прекращено производство ВПГ [13] всеми тремя фирмами-производителями, а для замены ПГ импортируются, то следует рассмотреть возможность совместных работ по внедрению ГПГ в проекты новой программы строительства АЭС в США.

Следует иметь в виду, что главный конкурент на рынке PWR – фирма "AREWA" - начала процесс сертификации АЭС с "EPR" в США, что свидетельствует об очевидном намерении конкурировать с фирмами США на территории США.

Последняя АЭС с PWR в США была пущена в 1996 году (строительство ее началось в 1974). За границей США в эти годы не построили ни одного блока. Атомная промышленность в США теряет опыт и кадры [11,30]. Сотрудничество России с США может в принципе быть продуктивным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Majumdar, Assessment of Current Understanding of Mechanism of Initiation, Arrest and Reinitiation of Stress Corrosion Cracks in PWR Steam Generator Tubing, NUREG/CR-5752, ANL, Argonne, 2000
2. K.Karwoski, L.Miller, N.Morgan, Regulatory Perspective on Steam Generator Tube Operating Experience, Nuclear Pressure Equipment Expertise and Regulation Symposium 2005, U.S. NRC, Rocville, 2005
3. Ph. Berge, J.M. Boursier, D. Dallery, F. de Keroulas, Y. Rouillon (EDF), Lessons learned from tubes pulled from French Steam Generators, Third International Steam Generator and Heat Exchanger Conference, Toronto, 1998
4. K.Karwoski, U.S. Operating Experience with Thermally Treated Alloy 600 Steam Generator Tubes, NUREG-1771, U.S. NRC, Washington, 2003
5. P.Millet, D.Hussey, Mechanism for Concentrating Impurities at Line Contact Tube Support Crevices in PWR SG's, Proceedings of U.S. NRC/EPRI/ANL Heated Crevices Seminar (Argonne, October 8-11 2002), NUREG/CP-0189, U.S. NRC, Washington, 2005
6. D.D. Malinowski, R.M. Wilson, M.J.Wooten, Operating Experience with Model F Westinghouse Steam Generator, NEA/CSNI Unipede Specialist Meeting on Operating Experience with Steam Generators, Brussels, 16-20 September, 1991
7. R.W.Staehle, J.A.Gorman, Quantitative Assessment of Submodes of Stress Corrosion Cracking on the Secondary Side of Steam Generator Tubing in Pressurized Water Reactors, Corrosion, part 1 (vol.59, No.11, 2003), part 2 (vol.60, No.1, 2004), part 3 (vol.60, No.12, 2004), NACE, Houston
8. P.E.MacDonald, V.N.Shah, L.W.Ward, P.G.Ellison, Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6335, INEL, Idaho Falls, 1996
9. Myong-Ho Song et al., Safety Review on Recent Steam Generator Tube Failure in Korea and Lessons Learned, IAEA Technical Meeting on Steam Generator Problems, Repair and Replacing, Prague, 2003
10. Meeting to Discuss Results of Spring 2005 Steam Generator Inspection at Oconee Nuclear Station, Unit 1, ml051940468, U.S. NRC, Washington, 2005
11. R.W.Staehle, J.A.Gorman, Predicting the Occurrence of Corrosion failures in Nuclear Power Components with Emphasis on Application of Alloy 690, Proceedings of the 2003 Nuclear Safety Conference, NUREG/CP-0185, U.S. NRC, Washington, 20-22 October. 2003
12. Comanche Peak Steam Electric Station (CPSSES) Unit 1 Tenth Refueling Outage (1RF10) Steam Generator Twelve Month Report, XR172869-01, U.S. NRC, Washington, 2004
13. Written Comments on Temporarily Suspending the Duty on Certain Steam or Other Vapor Generating Boilers Used in Nuclear Facilities, Committee on Ways And Means U.S. House of Representatives, 2001
14. Environmental Assessment of Diablo Canyon SG Replacement Projects, 2003
15. Steam Generator Tube Primary-To-Secondary Leakage, NRC Inspection Manual, Part 9900, U.S. NRC, Washington, 2001
16. K.Fruzetti, Materials Reliability Program. Effect of Zinc Addition on Mitigation of PWSCC of Alloy 600 (MPR78), Final Report 1003522, EPRI, Palo Alto, 2002
17. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Importing for Safety: Steam Generator, IAEA TECDOC-981, Vienna, 1997
18. Indian Point-2 Steam Generator Tube Failure Lessons Learned Report (TAV NO. MA9163), Final Report, U.S. NRC, Washington, 2000

19. Н.Б. Трунов, С.А. Логвинов, Ю.Г. Драгунов, Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР, Энергоатомиздат, Москва, 2001
20. Б.И. Лукасевич, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов, С.Е. Давиденко, Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций, ИКЦ "Академкнига", Москва, 2004
21. R.W.Staehle, Bases for Predicting the Earliest Penetrations Due to SCC to Alloy 600 on the Secondary Side of PWR Steam Generators, NUREG/CR-6737, U.S. NRC, Washington, 2001
22. C.R.Marks, Some Effects of Steam Generator Deposits on Crevice Chemistry, Proceedings of U.S. NRC/EPRI/ANL Heated Crevices Seminar (Argonne, October 8-11 2002), NUREG/CP-0189, U.S. NRC, Washington, 2005
23. J.G.Roberts, Challenges of Adolescent and Maturing Nuclear Plant: a Chemistry Perspective and Maintenance & Outages, 6-th International CANDU Maintenance Conference, November 16-18, 2003
24. K.J.Karwoski, Circumferential Cracking of Steam Generator Tubing, NUREG-1604, U.S. NRC, Washington, 1997
25. J.H. Morehouse, R.T. Liner, B.W. Johnson, J.F. Wimpey, Value-Impact Analysis of Recommendations Concerning Steam Generator Tube Degradations and Rupture Events, Draft Final Report, Science Application Inc., McLean,
26. Бергункер В.Д, Трунов Н.Б. , Денисов В.В., Анализ состояния труб парогенераторов на основе данных вихретокового контроля, 6-ой международный семинар по горизонтальным ПГ, Подольск, 2004
27. N.B. Trunov at al., WWER Steam Generator Tubing Performance and Ageing Management, Plim + Plex Conference, Paris, 2006
28. M.Merilo, M. Behravesh, Three Mile Island Plugged Tubes Severance. A Study of Damage Mechanisms, Topical Report 1008438, EPRI, Palo Alto, 2003
29. Llewellyn King, The Tribulations and the Joy of Nuclear, Westinghouse World View, Winter 2006

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЭС – атомная электрическая станция

ВПГ – вертикальный парогенератор

ВТК – вихретоковый контроль

ВХР – водно-химический режим

г/д – галлоны в день

ДЭ – дистанционирующий элемент

ТОТ – теплообменная труба

КРН – коррозионное растрескивание под напряжением

ПГ – парогенератор

СУЗ – система управления и защиты

КИП – контрольно-измерительные приборы

МКК – межкристаллитная коррозия

ЯК – язвенная коррозия

NRC – Nuclear Regulatory Commission

Plug – заглушка

Fat – Fatigue (усталость)

LP – Loose Part (потерянный предмет)

ODSCC – Outer Diameter Stress Corrosion Cracking

IDSCC - Inner Diameter Stress Corrosion Cracking

IGA – Inter Granular Attack

Sleeve - втулка