

## АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР

**В.А.Юрманов, С.В.Великопольский, Е.В.Юрманов  
ОАО «НИКИЭТ»**

Накопление продуктов коррозии (ПК) обуславливает ряд проблем при длительной эксплуатации АЭС, включая усиление процессов деградации оборудования вторых контуров, подшламовую коррозию и коррозионное растрескивание. Выведение коррозионного шлама и отложений продуктов коррозии из парогенераторов (ПГ) и другого оборудования энергоблоков ВВЭР связано с затратами времени и средств, а также образованием отходов. В условиях значительного увеличения сроков эксплуатации энергоблоков данная проблема обостряется и требует новых решений с учетом опыта отечественных и зарубежных АЭС.

В рамках «Комплексной программы экспериментального обоснования и разработки рекомендаций по обеспечению проектного ресурса оборудования второго контура на 2004–2010 г.», в частности, разработаны технические предложения по снижению накопления ПК на основе опыта отечественных и зарубежных АЭС. Технические предложения разработаны на основе обработки и анализа эксплуатационных данных Нововоронежской, Кольской, Калининской, Балаковской и Волгодонской АЭС, включая:

- результаты эксплуатационного контроля отложений на внутренних поверхностях оборудования и трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР;
- результаты контроля коррозионного состояния элементов второго контура на АЭС с ВВЭР, включая данные коррозионных испытаний с помощью образцов-свидетелей;
- данные по эффективности очистки турбинного конденсата (БОУ) и продувочной воды парогенераторов (СВО-5) от продуктов коррозии;
- данные по выведению отложений ПК из ПГ в процессе их химических отмывок;
- данные по эффективности стояночных консерваций оборудования и трубопроводов.

Анализ эксплуатационных данных и расчетно-экспериментальное обоснование мероприятий по снижению ПК во втором контуре АЭС с ВВЭР включало:

- анализ данных содержания ПК в рабочей среде вторых контуров и оценка эффективности их выведения;
- анализ результатов коррозионных исследований с использованием образцов-свидетелей;
- расчеты выведения ПК из второго контура установками очистки рабочей среды и при химических отмывках оборудования;
- оценку эффективности возможных способов снижения накопления ПК за счет снижения коррозионной агрессивности рабочей среды, оптимизации выбора конструкционных материалов, повышения эффективности очистки рабочей среды, проведение консерваций оборудования в периоды стоянок, проведения отмывок оборудования от отложений и шлама.

Сравнительный анализ исходных данных АЭС с ВВЭР показал значительные различия интенсивности накопления ПК во вторых контурах энергоблоков, что обусловлено как их проектными отличиями, так и особенностями эксплуатации.

Технические предложения по снижению накопления ПК во втором контуре разработаны с учетом предложений научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций:

- внедрение современных химических анализаторов для измерения микроконцентраций ПК в воде вторых контуров;
- повышение эффективности выведения ПК из рабочей среды вторых контуров установками очистки турбинного конденсата и продувочной воды парогенераторов;
- совершенствование контроля коррозионного состояния оборудования второго контура;
- регулярное проведение консерваций и отмывок оборудования вторых контуров с применением эффективных технологий;
- рациональный выбор конструкционных материалов при замене оборудования и трубопроводов на действующих энергоблоках, а также для изготовления оборудования и трубопроводов второго контура на проектируемых и сооружаемых энергоблоках;
- обоснованный выбор и оптимизация ведения водно-химического режима (ВХР).

В рамках данной работы выполнено расчетно-экспериментальное обоснование замены медьсодержащего оборудования и предложены перспективные методы контроля коррозии.

Атомно-эмиссионные анализаторы давно внедрены на Ленинградской АЭС и к настоящему времени успешно используются для измерения микроконцентраций ПК на АЭС с РБМК. Этот опыт перенимается АЭС с ВВЭР, в частности, с начала 2009 года на Балаковской АЭС получены фактические результаты измерения концентраций ПК в воде вторых контуров. Ранее подавляющая часть результатов измерений лишь указывала на неперевышение нижних пределов определения трудоемких устаревших фотоколориметрических методик анализа, соответственно, 4 и 2,5 мкг/дм<sup>3</sup> для железа и меди (рисунки 1-3).

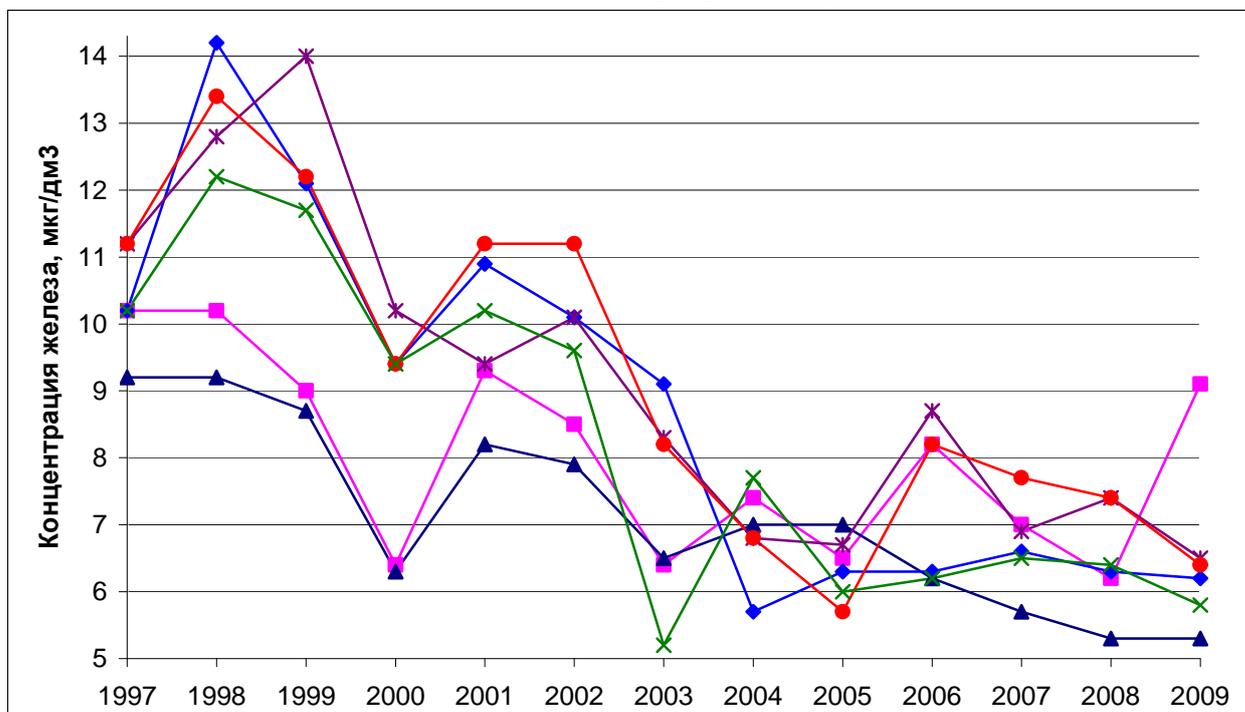


Рисунок 1 - Динамика концентрации железа в питательной воде ПГ энергоблоков ВВЭР-440

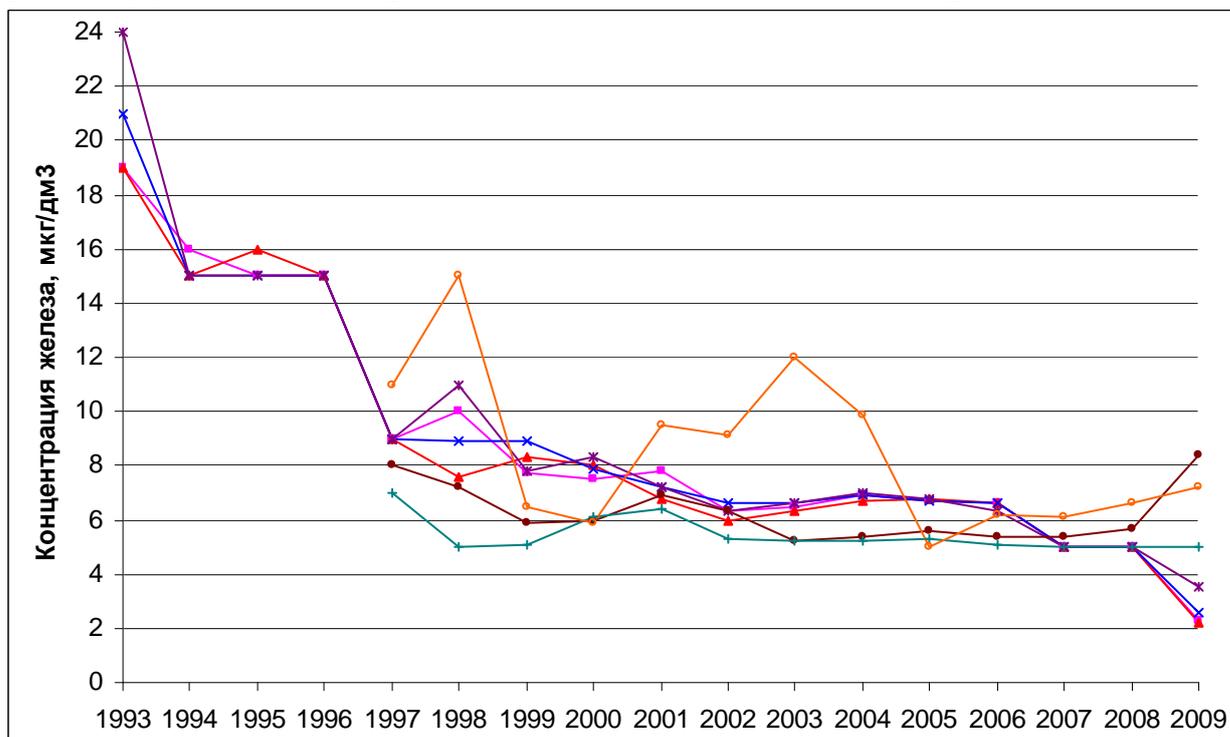


Рисунок 2 - Динамика концентрации железа в питательной воде ПГ энергоблоков ВВЭР-1000

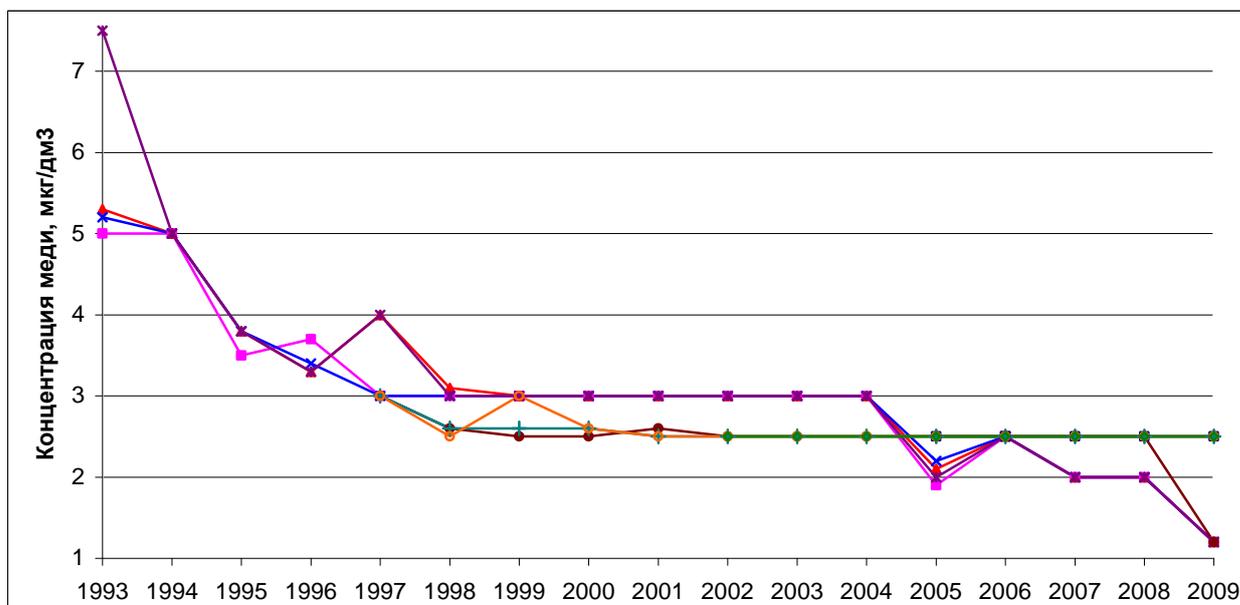


Рисунок 3 - Динамика концентрации меди в питательной воде ПГ энергоблоков ВВЭР-1000

Внедрение новых ВХР и химических технологий, направленных на снижение коррозии и уменьшение накопления ПК на всех энергоблоках ВВЭР предлагается в дальнейшем проводить лишь после внедрения современных химических анализаторов микроконцентраций ПК, поскольку только в этом случае можно количественно оценить эффективность реализации этих усовершенствований. В настоящее время производится ряд современных отечественных химических анализаторов, внедрение которых также может обеспечить решение задачи прецизионного контроля микропримесей продуктов коррозии в водах АЭС.

Предложения по повышению эффективности БОУ на блоках ВВЭР-1000 включают оптимальный выбор ионитов фильтров смешанного действия (ФСД), своевременное проведение взрыхляющих отмывок и регенераций, оптимизация режима электромагнитных фильтров (ЭМФ). Для новых блоков следует предусмотреть намывные ионитные фильтры в случае положительных результатов их внедрения на блоке №4 Калининской АЭС.

Предложения по повышению эффективности установки СВО-5 в зависимости от поддерживаемого ВХР включают оптимизацию режима работы, рациональный подбор ионитов, своевременная взрыхляющая отмывка и регенерация. Для новых блоков предлагается рассмотреть перспективность применения высокотемпературных фильтров (ВТФ) в случае положительных результатов их внедрения на АЭС Куданкулам.

Технические предложения о совершенствовании контроля коррозионного состояния оборудования второго контура включают:

- оценку накопления отложений в ПГ по результатам контроля выноса загрязнений при расхолаживании,
- организацию коррозионного и эрозионного контроля по образцам-свидетелям,
- использование данных толщинометрии трубопроводов для оценки роста отложений.

В зависимости от конструкционных материалов, поддерживаемого ВХР, продолжительности и условий стоянок предложения по совершенствованию технологии консерваций и отмывок оборудования вторых контуров включают:

- широкое внедрение технологии консервации с использованием пленкообразующих аминов;
- внедрение технологии сухой консервации с организацией контроля влажности окружающей среды;
- регулярное проведение предпусковых или предремонтных водных отмывок оборудования и трактов;
- своевременное проведение химических отмывок ПГ по второму контуру и карманов коллекторов учетом данных контроля накопления отложений и их химического состава.

Технические предложения по рациональному подбору конструкционных материалов при замене оборудования и трубопроводов второго контура на действующих энергоблоках, а также для изготовления оборудования и трубопроводов второго контура на проектируемых и сооружаемых энергоблоках в зависимости от конкретного оборудования и трубопроводов, а также интенсивности факторов их деградации в процессе эксплуатации включают:

- исключение применения медных сплавов для изготовления оборудования и трубопроводов вторых контуров и их замена на действующих энергоблоках;
- исключение применения для изготовления подверженных эрозионно-коррозионному износу (ЭКИ) участков оборудования и трубопроводов вторых контуров углеродистых сталей с содержанием хрома менее 0,3%,
- при заменах поврежденных вследствие ЭКИ участков трубопроводов предусматривать меры из защиты (напыление, покрытия и др.) или изготавливать их из эрозионно-стойкой стали (12Х1МФ и др.) или из сталей марок 20, 15ГС и 16ГС с содержанием хрома ~0,3%.

Технические предложения по рациональному выбору и оптимизации ведения ВХР в зависимости от применяемых конструкционных материалов, состояния технических средств поддержания ВХР (БОУ, СВО-5, водоподготовительной установки, узлы дозировки реагентов и др.), а также накопленного опыта эксплуатации на конкретных энергоблоках включают:

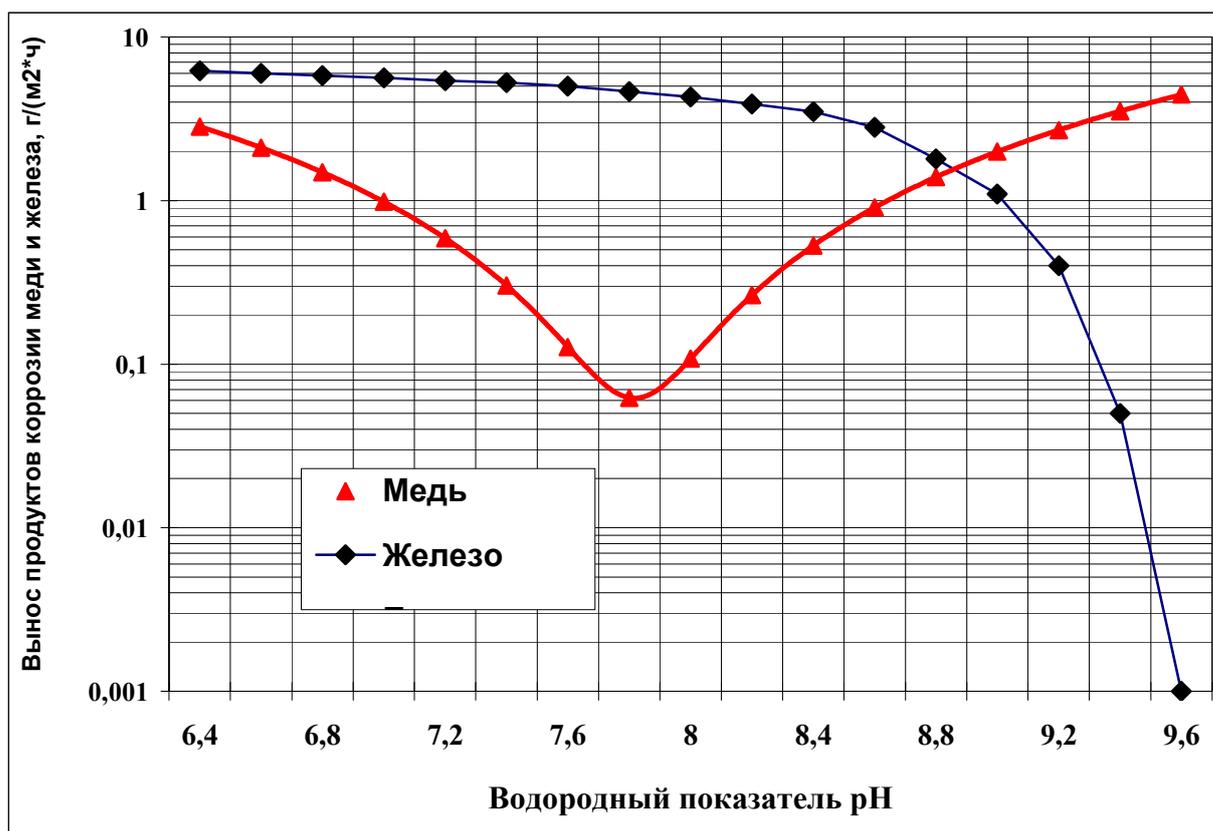
- расширение применения ВХР с применением этаноламина, а также оптимизация его ведения, в т.ч. за счет применения оптимальных смесей этаноламина с другими аминами;
- совершенствование ведения ВХР с применением морфолина (Ростовская АЭС);
- отработка технологии дозирования пленкообразующих аминов при коррекционной обработке рабочей среды (Кольская АЭС).

Обеспечение безопасной и надежной работы ПГ и теплообменного оборудования второго контура является приоритетной задачей при эксплуатации АЭС с ВВЭР. Работоспособность и ресурс ПГ определяется его трубной системой. По причине повреждений теплообменных труб (ТОТ) на блоках ВВЭР-1000 заменено 9 ПГВ-1000М. При эксплуатации первых блоков ВВЭР-1000 отмечается тенденция роста повреждаемости ПНД и конденсаторов турбин.

Несмотря на реализуемые мероприятия по повышению надежности эксплуатации конденсаторов турбин, деградация теплообменных труб конденсаторов из медесодержащих сплавов приводит к следующим проблемам:

- систематические отклонения качества рабочей среды от требований ВХР;
- разгрузки блоков для поиска и устранения присосов охлаждающей воды и, соответственно, недовыработка электроэнергии;
- увеличение затрат на поддержание ВХР второго контура;
- повышение риска коррозионного повреждения ТОТ ПГ и сварного соединения (СС) №111 приварки коллектора к корпусу;
- снижение остаточного ресурса парогенераторов;
- увеличение количества вредных сбросов в окружающую среду.

Коренной причиной коррозионных проблем второго контура АЭС с ВВЭР является использование оборудования из медесодержащих материалов, включая теплообменные поверхности всех конденсаторов турбины и, на большинстве энергоблоков, подогревателей низкого давления (ПНД). Наличие оборудования из медьсодержащих материалов сдерживает оптимизацию норм качества питательной и продувочной воды ПГ до норм ведущих стран (США, Франция, Германия, Япония). Опыт эксплуатации АЭС с РWR и ВВЭР, где реализованы мероприятия по исключению медьсодержащих материалов второго контура, свидетельствует о том, что повышение показателя рН питательной воды более 9,5 обеспечивает подавление коррозии стальных элементов и снижение концентрации железа с 8-15 мкг/л до 1-2 мкг/л. При этом значительно снижается рост отложений ПК на ТОТ и практически исключается необходимость проведения химических промывок ПГ. Ограничение отложений на поверхностях теплообмена сводит к минимуму повреждаемость ТОТ ПГ в результате процессов коррозии. Согласно рисунку 4 при одновременном использовании медных сплавов и углеродистых сталей невозможно подобрать ВХР, обеспечивающий одновременно подавление их коррозии.



**Рисунок 4 – Сравнение зависимости скорости выноса продуктов коррозии меди и углеродистой стали от водородного показателя pH водной среды**

Экспертные оценки интенсивности деградации теплообменных труб ПГ АЭС с ВВЭР-1000 в зависимости от наличия медесодержащих сплавов в оборудовании второго контура позволяют сделать следующие выводы:

- при отсутствии во втором контуре оборудования из медесодержащих материалов и соблюдении требований по эксплуатации интенсивность деградации ТОТ ПГ крайне мала;
- полная замена оборудования второго контура из медесодержащих материалов (ПНД и конденсаторов турбины) снижает рост отложений продуктов коррозии меди и железа на ТОТ ПГ, а после удаления накопленных отложений меди минимизируется повреждаемость ТОТ;
- процессы деградации ТОТ не ограничивают ресурс ПГ АЭС с ВВЭР-1000 после замены оборудования второго контура из медесодержащих материалов при условии соблюдения чистоты ТОТ ПГ, применения во втором контуре высокощелочных ВХР, а также обеспечения защиты от коррозии ТОТ в пусковых и стояночных режимах.

Таким образом, замена медных сплавов во вторых контурах АЭС с ВВЭР-1000 на коррозионно-стойкие материалы является приоритетной задачей для обеспечения безопасной и надёжной работы ПГ, что в сочетании с внедрением новых ВХР и мерами по исключению коррозии в стояночных и пусковых режимах позволит:

- устранить основную причину деградации трубного пучка ПГ и снизить риск появления и развития повреждений в зоне сварного соединения № 11;
- продлить остаточный ресурс ПГ, не имеющих существенных коррозионных повреждений ТОТ, в том числе на продленный период эксплуатации энергоблоков;
- обеспечить безопасную и надёжную эксплуатацию ПГ при переходе на 18-месячный топливный цикл, обеспечивая прогнозируемый рост КИУМ;
- значительно повысить надёжность ПНД и конденсаторов турбин с новыми трубными системами, обеспечить величину присосов охлаждающей воды на уровне мировых значений, поднять мощность турбоустановок в случае углубления вакуума в конденсаторах турбин.

Замена ПГ без замены медесодержащего оборудования нецелесообразна, так как в этом случае не исключается основная причина повреждаемости ТОТ и других элементов ПГ.

На основании результатов исследований и анализа опыта эксплуатации ПГ подготовлено решение о замене медесодержащего теплообменного оборудования второго контура для обеспечения надёжности и ресурса ПГ, повышения надёжности и эффективности оборудования второго контура энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000.

В период 1986-1991 г. по причине повреждения коллекторов на АЭС России и Украины заменено 33 ПГ. В 1990 годах модернизированы ПГ действующих энергоблоков для исключения основных причин повреждения коллекторов, при этом внесены соответствующие изменения в техническую документацию новых серий ПГ.

К настоящему времени определяющим надёжность и ресурс ПГ фактором является коррозионное состояние трубных систем ПГ из-за повреждения ТОТ. По этой причине в период 2000-2007 года на АЭС России и Украины заменены 9 ПГ. К повреждению труб приводят отложения окислов железа и меди на трубных системах ПГ.

Радикальное снижение накопления продуктов коррозии во вторых контурах, включая ПГ, достижимо лишь при значительном повышении показателя рН рабочей среды, что возможно при полном исключении меди из второго контура. Учитывая негативное влияние меди на повреждение ТОТ ПГ, медесодержащее оборудование исключено из проектов достраиваемых и проектируемых энергоблоков ВВЭР. К настоящему времени завершена замена медного оборудования на АЭС с ВВЭР Восточной Европы (кроме Словакии).

Научно-техническими советами концерна «Росэнергоатом» и Росатома рекомендована модернизация оборудования второго контура АЭС с ВВЭР-1000 с заменой конструктивных элементов, выполненных из медесодержащих сплавов.

Замена трубных систем из медных сплавов во втором контуре АЭС с ВВЭР-1000 на коррозионно-стойкие материалы обеспечит безопасную и надёжную работу ПГ в сочетании с внедрением новых ВХР и исключению стояночной коррозии, а также позволит:

- устранить основную причину деградации трубного пучка ПГ и снизить риск появления и развития повреждений в зоне сварного соединения № 111,
- продлить остаточный ресурс ПГ без существенных коррозионных повреждений ТОТ, в том числе на продленный срок блоков, исходя из малой скорости процессов деградации;
- обеспечить безопасную и надёжную эксплуатацию ПГ при переходе на 18-месячный топливный цикл, обеспечивая прогнозируемый рост КИУМ;
- повысить надёжность ПНД и конденсаторов со снижением присосов охлаждающей воды до уровня мировых стандартов, а также поднять мощность турбоустановок в случае углубления вакуума.

*Выражается благодарность специалистам ОАО «Концерн Росэнергоатом» (Перегудов Н.Н., А.В.Смирнягин, Соколов А.И., Ерзылёв С.А., С.В.Гащенко), ВНИИАЭС (Бараненко В.И., Клещук С.М.), НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (Харитонова Н.Л.), ВНИИАМ (Кукушкин А.Н., Репин Д.А.), ГИ ВНИПИЭТ (Стяжкин П.С., Николаев Ф.В.), а также Нововоронежской, Кольской, Калининской, Балаковской и Волгодонской АЭС*