

# ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВТОРОГО КОНТУРА АЭС С ВВЭР-1000

Брыков С.И., Сиряпина Л.А., Архипов О.П.  
ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС»  
Тяпков В.Ф., Ерпылева С.Ф.  
ФГУП ВНИИАЭС

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Надежная работа теплообменных труб парогенераторов (ПГ) является важнейшей задачей для АЭС различного типа во всем мире. Как показывает опыт эксплуатации основным фактором, влияющим на работоспособность теплообменных труб ПГ, является водно-химический режим второго контура (ВХР).

На АЭС с ВВЭР-1000 России во втором контуре применяется гидразинно-аммиачный ВХР (АВТ), который широко используется в тепловой энергетике и на АЭС с водо-водяными реакторами с 70-х годов прошлого столетия. При этом в зависимости от набора конструкционных материалов оборудования конденсатно-питательного тракта (КПТ) гидразинно-аммиачный ВХР на АЭС с PWR и ВВЭР применяется в следующих модификациях:

- АВТ с величиной рН питательной воды до 9.2 (при наличии в КПТ оборудования из медьсодержащих сплавов);
- АВТ ВХР с величиной рН более 9.2 до 9.8;
- High АВТ ВХР с величиной рН более 9.8 (в обоих случаях при отсутствии в КПТ оборудования из медьсодержащих сплавов).

Для ПГ АЭС с ВВЭР-1000 основным механизмом, ответственным за повреждение теплообменных труб, является процесс коррозионного растрескивания под напряжением в результате воздействия растягивающих напряжений и концентрированных растворов коррозионно-активных примесей, образующихся вследствие глубокого упаривания «котловой» воды в отложениях. При этом активатором коррозии являются хлорид-ионы, а также сульфат-ионы. В качестве окислителя выступает кислород, медь и ее соединения.

Достаточно характерно, когда трещина инициируется в местах образования язв. Трещины, чаще всего, ориентированы вдоль оси теплообменной трубки и могут иметь как межкристаллитный, так и транскристаллитный и смешанный характер. Результаты металлографических исследований вырезанных трубок свидетельствуют о связи образования язв с осаждением в отложениях металлической меди. При этом, как правило, причиной повреждения теплообменных труб является недопустимый уровень удельной загрязненности отложениями соединений железа и меди (локально до 500-1000 г/м<sup>2</sup> при допустимой величине 150 г/м<sup>2</sup>). При наличии таких отложений на теплообменных трубках ПГ вопрос может стоять только в том, насколько будет длителен период до их повреждения.

## 2. ПРОБЛЕМЫ ВХР ВТОРОГО КОНТУРА

Поскольку в проектах АЭС с ВВЭР-1000 первого поколения трубные системы конденсатора турбины и ПНД выполнены из медьсодержащих сплавов, то для второго контура был принят аммиачно-гидразинный ВХР с величиной рН питательной воды 9.0±0.2. При таком ВХР особенно сложной задачей является подавление процессов коррозии-эрозии оборудования и трубопроводов КПТ, изготовленных из углеродистых сталей (так называемая FACS проблема - Flow Assisted Corrosion) и работающих в области влажного пара и двухфазных потоков.

Кроме того, что особенно важно, из-за высокого коэффициента распределения аммиака между кипящей водой и паром, практически невозможно нейтрализовать

действие анионов сильных кислот (хлоридов и сульфатов) в продувочной воде ПГ при рабочих температурах. Присутствие же в продувочной воде ПГ анионов сильных кислот приводит к значительному ускорению коррозионных процессов. Наличие во втором контуре АЭС с ВВЭР-1000 оборудования из медьсодержащих материалов сдерживает дальнейшую оптимизацию норм качества питательной и продувочной воды ПГ до уровня норм ведущих ядерных стран (США, Франции, Германии, Японии) по следующим причинам:

- не позволяет повысить величину рН питательной воды выше 9,2 с целью минимизации процессов коррозии-эрозии оборудования и трубопроводов КПП и поступления продуктов коррозии железа в ПГ;

- не позволяет снизить нормы содержания коррозионно-активных примесей в продувочной воде ПГ (хлоридов, сульфатов, натрия) из-за невозможности обеспечить плотность конденсаторов турбин по водяной стороне на уровне менее 0.0001 %, (т.е. обеспечить протечку охлаждающей воды менее 3.6 л/ч). За более чем двадцатилетний период эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 нормируемая величина содержания хлоридов в продувочной воде ПГ снизилась с 500 до 100 мкг/кг, натрия с 1000 до 300 мкг/кг, а нижняя граница величины рН повысилась с 7.8 до 8.5. Нормирование сульфатов в продувочной воде ПГ (не более 200 мкг/кг) введено лишь с 1997 г.

При этом следует отметить, что трубные системы конденсаторов турбин большинства АЭС с РWR изготовлены из титановых сплавов, что позволяет минимизировать протечку охлаждающей воды менее 0,05 л/ч, содержание хлоридов, сульфатов и натрия в продувочной воде ПГ нормировать на уровне не более 20 мкг/кг, а удельную электропроводность Н-катионированной пробы - на уровне 0.8-1.0 мкСм/см.

Применение этих ВХР позволило снизить концентрацию железа в питательной воде до 1-2 мкг/кг и даже менее 1 мкг/кг, а вместе с тем - значительно снизить загрязненность теплообменных труб ПГ отложениями продуктов коррозии.

С целью повышения надежности и долговечности ПГ действующих АЭС с ВВЭР-1000 наиболее кардинальной является замена трубной системы конденсаторов турбин, изготовленной из медьсодержащих сплавов на титановые сплавы или нержавеющие стали, а трубной системы ПНД и ПВД - на коррозионно-стойкие стали при одновременном переходе на АВТ ВХР второго контура с величиной рН питательной воды 9.4-9.6 или High АВТ ВХР с величиной рН питательной воды более 9.8. При этом фактическое содержание железа в питательной воде составляет 1-5 мкг/кг и менее.

Такая концепция реализована для новых проектов АЭС с ВВЭР-1000 (АЭС «Куданкулам» в Индии, Тяньваньская АЭС в Китае, 5 энергоблок Балаковской АЭС). Для действующих же энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 замена трубной системы конденсаторов турбин, ПВД и ПНД эксплуатирующей организацией (концерн «Росэнергоатом») пока не предусматривается, так как считается очень дорогостоящим мероприятием. Однако эти затраты не сравнимы с затратами, связанными с заменой ПГ из-за повреждения теплообменных труб, которые в свою очередь зависят от материала оборудования КПП и ВХР второго контура.

### **3. ОПЫТ ВЕДЕНИЯ ВХР НА АЭС С РWR И ВВЭР С ДОЗИРОВАНИЕМ МОРФОЛИНА И ВЫСШИХ АМИНОВ**

Как было сказано выше с целью подавления процессов коррозии-эрозии оборудования и трубопроводов КПП, изготовленных из углеродистых сталей (FAC проблема) и нейтрализации действия анионов сильных кислот в двухфазных средах второго контура, на большинстве АЭС с РWR применяются ВХР с дозированием морфолина и высших аминов (в основном этаноламина и диметиламина).

В таблице 1 приведены для сравнения некоторые характеристики аммиака, морфолина и этаноламина.

**Таблица 1****Некоторые характеристики аммиака, морфолина и этаноламина**

Наименование	Формула	Молекулярная масса	Логарифм константы диссоциации, рК <sub>б</sub>		Коэффициент распределения между водой и паром, К <sub>р</sub>	
			25 °С	250 °С	25 °С	250°С
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17	4.76	6.05	13.2	4.98
Морфолин	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ONH	87	5.67	5.96	0.98	1.33
Этаноламин	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (OH)NH <sub>2</sub>	61	4.75	4.8* (при 145°С)	0.01	0.66** (при 300°С)

\* - по данным /1/;

\*\* - по данным /2/.

Для второго контура АЭС с PWR, где имеется оборудование, изготовленное из медьсодержащих сплавов, вместо AVT ВХР применяется морфолиновый ВХР (с величиной рН питательной воды 9.2-9.4), поскольку из-за более низкого коэффициента распределения морфолин обладает лучшими свойствами по сравнению с аммиаком, особенно, в двухфазовых средах второго контура, что значительно уменьшает процессы эрозии-коррозии оборудования второго контура.

Особенно широкое применение морфолиновый ВХР нашел на АЭС с PWR во Франции. Морфолиновый ВХР с середины 80-х годов 20-го столетия применяется и на АЭС с PWR в США и Канады, несмотря на то, что в оборудовании КПП подавляющего большинства блоков отсутствуют медьсодержащие сплавы.

Опыт эксплуатации АЭС с PWR показывает, что при переходе на морфолиновый ВХР достигается заметное снижение общей концентрации железа (в среднем в 4 раза) и уменьшение концентрации меди (в среднем в 1,5 раза) в питательной воде ПГ (снижение FAC). Это в свою очередь уменьшает скорость накопления отложений на теплообменных трубках и образования шлама в ПГ в 3-4 раза.

К 1995 году по данным "WANO Performance Indicator Report Midyear 1995" количество блоков, на которых применяется морфолиновый ВХР второго контура, составляло 98 (таблица 2).

**Таблица 2****Данные применения морфолинового ВХР второго контура на АЭС с PWR**

Страна	Общее количество блоков АЭС с PWR	Количество блоков, на которых применяется морфолиновый ВХР	% применения морфолинового ВХР
США	62	44	71
Франция	53	39	74
Канада	19	15	79
Всего	134	98	73

На АЭС с ВВЭР-1000 Украины опытно промышленная эксплуатация морфолинового ВХР ведется на трех энергоблоках Южно-Украинской АЭС и двух энергоблоках Запорожской АЭС /3/. На энергоблоках № 1,2,3 Южно-Украинской АЭС, где морфолиновый ВХР ведется уже на протяжении нескольких лет, концентрация железа в питательной воде снизилась до 4-5 мкг/кг, а величина рН в продувочной воде ПГ повысилась до 9.0-9.1. При этом по данным Южно-Украинской АЭС заметно снизилась удельная загрязненность теплообменных труб ПГ.

Переход на морфолиновый ВХР второго контура на энергоблоках №№4,5 Запорожской АЭС, позволил устойчиво поддерживать величину рН питательной воды на уровне 9.1-9.2, а в продувочной воде – 8.7-8.9. При этом концентрация железа в питательной воде ПГ снизилась в среднем с 8,3 мкг/кг до 4,7 мкг/кг.

Таким образом, переход на морфолиновый ВХР на Южно-Украинской и Запорожской АЭС позволил:

- во-первых, выровнять величину рН в потоках второго контура и устойчиво поддерживать величину рН питательной воды на уровне 9.1-9.2;
- во-вторых, снизить процессы эрозии–коррозии оборудования и трубопроводов КПП, выполненного из углеродистых сталей и медных сплавов, тем самым, уменьшить концентрацию продуктов коррозии в питательной воде, и, как следствие, снизить скорость образования отложений на теплообменных трубках ПГ.

При этом сокращения фильтроцикла установки СВО-5 не произошло, а качество очистки рабочей среды не ухудшилось.

В России в 2004 году планируется начать проведение опытно-промышленных испытаний морфолинового ВХР на блоке №1 Волгодонской АЭС. Для этой цели разработаны Техническое решение и Программа испытаний.

Начиная с 90-х годов 20-го столетия на АЭС с PWR США и ряда других стран, (Корея, Южная Африка, Япония) наряду с AVT и морфолиновым ВХР начал широко применяться ВХР с использованием высших аминов (этаноламин, диметиламин и триэтаноламин). В настоящее время ВХР с использованием высших аминов (в основном этаноламин и диметиламин) применяется на более чем 80% АЭС с PWR США /4/.

Рассмотрим опыт применения во втором контуре АЭС с PWR высших аминов – этаноламина (ETA) и диметиламина (DMA).

Так, по данным /5/ с 1998 года во втором контуре АЭС “Kori” (Корея, два блока по 556 МВт) вместо AVT применяется этаноламиновый ВХР (ETA).

В таблице 3 приведены результаты измерения величины рН (при 25°С) в различных потоках второго контура при AVT ВХР (концентрация аммиака 1.2-1.3 мг/кг) и ETA ВХР (концентрация этаноламина около 2 мг/кг). Здесь же приведены значения высокотемпературного рН<sub>т</sub>, рассчитанные с помощью кода ChemWORD (EPRI).

**Таблица 3**

**Результаты измерения величины рН (при 25°С) и расчетные величины рН<sub>т</sub> в различных потоках второго контура при AVT ВХР (концентрация аммиака 1.2-1.3 мг/кг) и ETA ВХР (концентрация ETA около 2 мг/кг)**

Наименование		Конденсат	Питательная вода ПГ	Паровая сторона ПВД	Продувочная вода ПГ	Пар ПГ	Дренажи сепаратора-пароперегревателя
рН (25°С)	AVT	9.5	9.4	9.5	9.2	9.6	-
	ETA	9.25	9.2	9.2	9.6	9.3	-
рН <sub>т</sub>	AVT	9.5	6.28	6.26	5.95	5.95	5.93
	ETA	9.2	6.37	6.41	6.23	6.23	6.35

Как видно из таблицы 3, при AVT ВХР (величина рН питательной воды равна 9.5) высокотемпературный рН<sub>т</sub> в продувочной воде ПГ составляет 5.95. При ETA ВХР (величина рН питательной воды равна 9.25) значение высокотемпературного рН<sub>т</sub> составляет 6.23 и гарантированно находится в щелочной области, в которой протекание коррозионных процессов (FAC) ослаблено.

Концентрация железа в питательной воде с переходом на ETA ВХР снизилась с 6 до 2 мкг/кг, а загрязненность теплообменных труб уменьшилась на 88%.

Это наглядно демонстрируют данные “Hideout return” во время останова блока (таблица 4). Количество катионов и анионов в продувочной воде ПГ при ЕТА ВХР, измеренные во время останова энергоблока АЭС “Kori”, были на порядок ниже, чем при АВТ ВХР.

Таблица 4

**Данные “Hideout return” во время останова энергоблока АЭС “Kori” (Республика Корея) при ведении ЕТА ВХР**

ВХР	ПГ	Na, г	Ca, г	Mg, г	Cl, г	SO <sub>4</sub> , г	SiO <sub>2</sub> , г	Органика, г
АВТ	А	11.7	234.6	20.7	4.2	289.0	1120.0	-
	В	8.0	241.6	13.3	3.4	349.6	995.1	-
ЕТА	А	0.5	25.7	2.3	0.5	29.0	56.5	0.9
	В	0.6	20.7	1.9	0.5	27.9	47.7	0.9

АЭС “Koeberg” (Южная Африка, 2 блока по 600 МВт) с 1997г. перешла с АВТ на ЕТА ВХР второго контура /6/. При ведении АВТ ВХР величина рН питательной воды составляла 9.6-9.7, а при переходе на ЕТА ВХР – 9.6 (при концентрации этаноламина порядка 3 мг/кг). При ведении ЕТА ВХР отмечается выравнивание величины рН во всех потоках второго контура – от 9.55 в конденсате до 9.67 в продувочной воде ПГ. Высокотемпературный же рН<sub>т</sub> продувочной воды ПГ составляет 6.29, т.е. находится в щелочной области. Концентрация железа в питательной воде при переходе на ЕТА ВХР снизилась с 4-5 мкг/кг до 2-3 мкг/кг, а в отдельные периоды работы – до 1 мкг/кг и менее.

На 1 и 2 блоках АЭС “Ikata” (Япония) с середины 90-х годов вместо АВТ ВХР внедрен ЕТА ВХР с величиной рН питательной воды на уровне 9.2 и с сохранением дозирования небольшого количества аммиака и гидразина (ЕТА – 0.5-1.5 мг/кг, аммиак – 0.3-0.4 мг/кг, гидразин – 0.2-0.3 мг/кг). Ведение такого ВХР позволило, как отмечалось выше, выровнять величины рН во всех потоках второго контура, а концентрацию железа в питательной воде снизить в 1.5-2 раза по сравнению с АВТ ВХР /4/.

На АЭС “Comanche Peak” (США, два блока по 1150 МВт) с 1997 г. применяется дозирование во второй контур диметиламина (DMA) совместно с морфолином взамен High АВТ.

Внедрение данного ВХР проходило в несколько этапов. На первом и втором этапах дозировался только морфолин, на третьем осуществлялась оптимизация дозирования морфолина. В конце третьего этапа добавлялся диметиламин, с четвертого по восьмой этапы – оптимизировалось дозирование диметиламина и морфолина.

В таблице 5 приведены данные по внедрению диметиламин-морфолинового ВХР на блоке 1 АЭС “Comanche Peak”.

Как видно из таблицы 5 внедрение диметиламин-морфолинового ВХР (DMA) на блоке 1 АЭС “Comanche Peak” позволило снизить концентрацию железа в питательной воде с 8-10 мкг/кг до 0.55 мкг/кг и менее. При этом даже в периоды пуска блока концентрация железа в питательной воде не повышалась более 6 мкг/кг. После внедрения диметиламин-морфолинового ВХР также значительно снизилась загрязненность теплообменных труб и трубной доски, что позволило отказаться от проведения химических промывок ПГ.

Таблица 5

**Этапы внедрения дозирования диметиламина (DMA) совместно с морфолином на блоках АЭС “Comanche Peak” (США)**

Этапы	Реагенты	Концентрации DMA и морфолина, мг/кг	Концентрация железа в питательной воде ПГ, мкг/кг
Этап 1 и 2	Дозирование морфолина	4-6	8-10
Этап 3	Оптимизация дозирования морфолина	8-10	≈ 2.5
Окончание этапа 3	Дозирование DMA	0.2-0.4	≈ 1.5
Этап 4	Оптимизация дозирования DMA	0.4-0.6	≈ 0.8-1.0
	Оптимизация дозирования морфолина	20	
Этапы 5-8	Оптимизация дозирования DMA	1	≈ 0.55 на этапе 5 и 0.27-0.4 на этапах 6-8
	Оптимизация дозирования морфолина	35	

Заслуживает также внимания 6-и недельный опыт дозирования в 2001 г. ЕТА на блоке №3 АЭС «Богунце» в республике Словакия (РУ ВВЭР-440) при наличии в КПП оборудования, изготовленного из медьсодержащих материалов (конденсаторы турбины) /8/. Концентрация ЕТА в питательной воде в начальный период испытаний составляла 0.15-0.4 мг/кг, на последующей стадии - в среднем 1.75 мг/кг. При проведении испытаний концентрация железа в питательной воде снизилась до 5 мкг/кг.

В связи с тем, что коэффициент распределения между кипящей водой и паром у морфолина и высших аминов (эаноламина и диметиламина) намного меньше, чем у аммиака, то концентрация их в воде ПГ выше, чем в паре, а, следовательно, нагрузка на систему очистки продувочной воды ПГ должна быть выше.

Опыт внедрения на Южно-Украинской и Запорожской АЭС ВХР с дозированием морфолина показал, что при использовании в фильтрах СВО-5 ионообменных смол гелевого типа с содержанием 8-12% дивинилбензола фильтроцикл снижается ненамного по сравнению с аммиачно-гидразинным ВХР.

При ведении же ЕТА ВХР на АЭС с РWR фильтроцикл системы очистки продувочной воды ПГ при использовании ионообменных смол гелевого типа снижается заметнее, чем при морфолиновом ВХР (почти в 2 раза) и составляет 50-80 суток /5,6/. При использовании же макропористых ионитов, селективность которых к натрию в присутствии высших аминов выше, чем у ионитов гелевого типа, приводит к увеличению фильтроцикла системы очистки продувочной воды ПГ.

Так как на АЭС с РWR протечки охлаждающей воды в конденсаторах турбин составляют 50 мл/ч и менее, то на большинстве блоков АЭС с РWR ФСД конденсатоочистки находятся в резерве. На блоках АЭС с РWR, где ФСД конденсатоочистки находятся в работе постоянно или подключаются эпизодически, фильтроцикл их при использовании смол в  $H^+$  и  $OH^-$  форме увеличился ненамного по сравнению с АВТ ВХР. Однако при использовании макропористых селективных смол в аминной форме фильтроцикл ФСД составляет более 270 суток /7/.

#### 4. ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ НА АЭС С ВВЭР ЭТАНОЛАМИНОВОГО ВХР

Для АЭС с ВВЭР-1000 наиболее привлекательным является ЕТА ВХР, так как этаноламин по сравнению с морфолином имеет меньшую молекулярную массу и большую константу диссоциации, и, для получения одинакового значения рН этаноламина требуется меньше, чем морфолина (см. таблицу 1). Кроме того, этаноламин гораздо дешевле морфолина и, в отличие от морфолина, выпускается отечественной промышленностью (морфолин необходимо закупать по импорту).

В таблице 6 приведены результаты расчета величины рН (при 25°С) и рН<sub>т</sub> в различных потоках второго контура при ведении ЕТА ВХР на АЭС с ВВЭР-1000 с использованием программного кода MULTEQ. Здесь же для сравнения приведены эксплуатационные данные по величине рН (при 25°С) и расчетные значения рН<sub>т</sub> в различных потоках второго контура при ведении гидразинно-аммиачного ВХР на АЭС с ВВЭР-1000 России. При этом расчет величины рН продувочной воды проводился, исходя из усредненных эксплуатационных данных (блок №2 Балаковской АЭС, 2003 г.) по качеству продувочной воды (содержание хлоридов 20 мкг/кг, сульфатов 40 мкг/кг и натрия 25 мкг/кг).

Таблица 6

**Сравнение расчетных значений величины рН (при 25°С) и рН<sub>т</sub> в различных потоках второго контура при ЕТА ВХР (концентрация ЕТА в питательной воде 1.5 мг/кг) и при гидразинно-аммиачном ВХР (концентрация аммиака в питательной воде 0.5 мг/кг) для АЭС с ВВЭР-1000**

Наименование		Питательная вода ПГ (220 °С)	Продувочная вода ПГ (280 °С)	Пар ПГ (280 °С)	Конденсат (40 °С)
Величина рН (при 25°С)	Аммиачно-гидразинный ВХР	9.2 (0.5)	8.72 (0.12)	9.14 (0.42)	9.11 (0.38)
	ЕТА ВХР	9.21 (1.5)	9.62 (6.0)	9.21 (1.5)	9.19 (1.4)
Величина рН <sub>т</sub>	Аммиачно-гидразинный ВХР	6.06	5.7	5.84	8.64
	ЕТА	6.16	6.24	5.96	8.73

Примечания. 1. В скобках указаны концентрации аммиака или ЕТА, мг/кг.

2. Расчет величины рН продувочной воды проводился исходя из усредненных эксплуатационных данных (содержание хлоридов 20 мкг/кг, сульфатов 40 мкг/кг и натрия 25 мкг/кг).

Таким образом, расчетные оценки показывают, что переход с существующего низкощелочного гидразинно-аммиачного ВХР на этаноламинный (ЕТА) ВХР, позволит:

- выровнять величину рН в потоках второго контура, особенно, в двухфазных средах, и устойчиво поддерживать величину рН питательной воды на уровне 9.2, а продувочной воды ПГ – на уровне 9.6;

- снизить процессы эрозии–коррозии оборудования и трубопроводов КПП, выполненных из углеродистых сталей, тем самым, уменьшить концентрацию продуктов коррозии в питательной воде (до 5 мкг/кг и менее), и, как следствие, значительно снизить скорость образования отложений продуктов коррозии на теплообменных трубках ПГ.

Это в свою очередь позволит существенно снизить повреждаемость теплообменных труб ПГ.

Опытно-промышленные испытания ВХР с дозированием ЕТА целесообразно провести на одном из блоков Балаковской АЭС.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Опыт эксплуатации АЭС с ВВЭР и PWR показывает, что основным фактором, влияющим на работоспособность теплообменных труб ПГ, является ВХР второго контура.

Для ПГ АЭС с ВВЭР-1000 основным механизмом, ответственным за повреждение теплообменных труб, является процесс коррозионного растрескивания под напряжением в результате воздействия концентрированных растворов коррозионно-активных примесей, образующихся вследствие глубокого упаривания «котловой» воды в отложениях на теплообменных трубках ПГ. Отложения образуются в результате поступления продуктов коррозии железа в ПГ вследствие протекания процессов коррозии-эрозии оборудования и трубопроводов КПП, изготовленных из углеродистых сталей (FAC проблема - Flow Assisted Corrosion).

2. С целью снижения поступления продуктов коррозии в ПГ на АЭС с PWR ведущих ядерных стран мира последние 10-20 лет во втором контуре применяются следующие ВХР:

- гидразинно-аммиачный с величиной рН питательной воды 9.4-9.8 (AVT ВХР);
- высокощелочной с величиной рН питательной воды > 9.8 (High AVT ВХР);
- морфолиновый;
- с дозированием высших аминов – в основном этаноламина или диметиламина (в смеси с морфолином).

Применение этих ВХР позволило снизить концентрацию железа в питательной воде до 1-2 мкг/кг и даже менее 1 мкг/кг, а вместе с тем - значительно снизить загрязненность теплообменных труб и трубной доски ПГ отложениями продуктов коррозии, что позволило отказаться от проведения химических промывок.

3. При наличии во втором контуре АЭС с ВВЭР-1000 оборудования, трубные системы которого изготовлены из медьсодержащих сплавов (конденсаторы турбин, ПНД), необходимо с существующего низкощелочного гидразинно-аммиачного ВХР перейти на ВХР с дозированием морфолина или этаноламина (ЕТА). При этом, даже не повышая величину рН питательной воды более 9.2, это позволит:

- выровнять величину рН в потоках второго контура, особенно, в двухфазовых средах, и устойчиво поддерживать величину рН питательной воды на уровне 9.2, а продувочной воды ПГ – на уровне 8.9-9.1 при дозировании морфолина и на уровне 9.6 при дозировании ЕТА;
- снизить процессы эрозии-коррозии оборудования и трубопроводов КПП, выполненных из углеродистых сталей, тем самым, уменьшив концентрацию продуктов коррозии в питательной воде (до 1-5 мкг/кг), и, как следствие, значительно снизить скорость образования отложений продуктов коррозии на теплообменных трубках ПГ.

Это в свою очередь позволит существенно снизить повреждаемость теплообменных труб ПГ.

Опытно-промышленные испытания морфолинового ВХР целесообразно провести на блоке №1 Волгодонской АЭС, а ВХР с дозированием ЕТА – на одном из блоков Балаковской АЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.J.Fountain, I.Smiesko. Computer Modelling the Potential Benefits of Amines in NPP Bohunice Secondary circuit. JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Kashiwazaki, Japan, October, 1998.

2. К.Хино. Испытания для определения оптимальной концентрации вводимого этаноламина на 1-м и 2-м блоках АЭС «Иката». Украинско-японский семинар, Южно-Украинск, Украина, 13-22 сентября, 2003.



3. Архипенко А.В. Состояние водно-химических режимов основных и вспомогательных контуров АЭС Украины и основные направления их совершенствования - «Энергоатом», Украина. Доклад на научно-техническом совещании «Водно-химический режим АЭС», 13-17 октября 2003 г., г. Десногорск.

4. PWR Advanced Amine Application Guidelines: Revision 2. Report TR-102952-R2, EPRI, 1997.

5. K.K.Park, J.B.Lee and S.W.Yoon. “ETA Chemistry Experience and Assessment on NPP in Korea”. International Conference “Chemistry in water reactors”, SPEEN, Avignon, France, 22-26 April, 2002.

6. K.J.Galt. “Ethanolamine Experience at Coeberg Nuclear Power Station, South Africa”. International Conference “Chemistry in water reactors”, SPEEN, Avignon, France, 22-26 April 2002.

7. B.Fellers, J.Stevens, G.Nichols. “Strategic Elements of Steam Cycle Chemistry Control Practices at TXU’S Comanche Peak Steam Electric Station”. International Conference “Chemistry in water reactors”, SPEEN, Avignon, France, 22-26 April 2002.

8. I.Smiesko, J.Bystriansky, A.Szalo “Use of Ethanolamine for Alkalisiation of Secondary Coolant First Experience at VVER Reactor. International Conference “Chemistry in water reactors”, SPEEN, Avignon, France, 22-26 April 2002.