

УДК 355.452

## ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*И.М. Фольтов<sup>1</sup>, А.В. Архипенко<sup>1</sup>, А.Н. Масько<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup>ГП НАЭК “Энергоатом”, <sup>2</sup> ГП “ТНЦ СКАР”)

Представлены результаты ведения водно-химического режима на АЭС Украины в 2003–2007 годах. Проанализированы основные мероприятия по совершенствованию ВХР, такие как коррекционная обработка рабочей среды органическими аминами, консервация оборудования и реконструкция систем химического контроля. Показано, что внедрение современных методов и средств организации и ведения ВХР обеспечит безопасную, надежную и экономичную работу теплоэнергетического оборудования энергоблоков АЭС на протяжении проектного срока эксплуатации и за его пределами. Дана сравнительная оценка состояния ВХР на лучших зарубежных АЭС с реакторами типа PWR и украинских АЭС, на основании которой предложены мероприятия по дальнейшему совершенствованию ВХР АЭС с реакторами типа ВВЭР.

### ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование химических технологий на украинских АЭС осуществляется в соответствии с “Программой реконструкции и модернизации оборудования химических цехов и совершенствования химических технологий” Государственного предприятия НАЭК “Энергоатом”.

Программа предусматривает выполнение таких основных мероприятий:

- коррекционная обработка рабочей среды второго контура органическими аминами (морфолином, этаноламином, октадециламином);
- модернизация систем автоматического и лабораторного химического контроля (ЛХК);
- создание экспертно-диагностических систем (ВХР);
- совершенствование ВХР вспомогательных систем;
- реконструкция химводоочистки (ХВО);
- внедрение ВХР первого контура (ВХР-1) с дозированием газообразного водорода вместо аммиака.

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВХР ВТОРОГО КОНТУРА

Гидразин-аммиачный водно-химический режим второго контура (ВХР-2), долгое время бывший традиционным для АЭС с реакторами типа ВВЭР, приводил к образованию значительного количества продуктов коррозии железа и меди и их поступлению в парогенератор (ПГ) с питательной водой. Это было причиной накопления шламов и подшламовой коррозии в ПГ. Для устранения этих негативных процессов в последние годы на украинских АЭС лицензированы и внедрены ВХР-2 с применением органических аминов, как для коррекционной обработки рабочей среды второго контура на протяжении всей топливной компании (морфолин, этаноламин), так и для консервации в течение нескольких суток перед остановом на ППР (октадециламин). В настоящее время морфолиновый ВХР-2 ведется на энергоблоках ЗАЭС-1–6, ЮУАЭС-1–3,

ХАЭС-2, этаноламиновый ВХР-2 – на энергоблоках РАЭС-3,4 (Таблица 1), а октадециламиновая консервация проводится на энергоблоках ЗАЭС-1–6.

Таблица 1. Средние значения показателей качества рабочей среды при ведении морфолинового и этаноламинового режима 2 контура на АЭС Украины в 2007 году

Блок	Питательная вода						Продувочная вода					
	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	pH	O <sub>2</sub>	Fe	Cu	Морф (ЭТА)	Cl	Na	pH	X <sub>н</sub>	Li	SO <sub>4</sub>
	мкг/кг	единиц	мкг/кг	мкг/кг	мкг/кг	мг/кг	мкг/г	мкг/кг	единиц	мкСм/см	мкг/кг	мкг/кг
Нормы		8,8-9,2	≤10	≤15	≤5,0	2-5 (0,6-0,8)	≤100	≤300	8,0-9,2	≤5,0	20-80	≤200
ЗАЭС 1	5,2	9,1	0,5	5,0	3,2	3,4	<40	29	9,0	1,5	–	36
ЗАЭС 2	5,2	9,1	0,3	4,4	3,3	3,2	<40	25	9,0	1,9	–	59
ЗАЭС 3	4,1	9,1	0,8	4,8	3,5	3,3	55	59	9,0	2,4	–	79
ЗАЭС 4	11,0	9,1	0,9	4,7	3,1	3,3	47	83	9,0	2,5	–	98
ЗАЭС 5	6,4	9,0	0,6	5,9	2,4	3,4	<40	25	8,9	1,5	–	58
ЗАЭС 6	8,9	9,1	0,5	5,9	2,7	3,1	47	47	9,0	1,7	–	80
ЮУ 1	7,9	9,2	0,8	3,7	2,0	3,6	<40	72	9,1	2,2	–	115
ЮУ 2	8,8	9,2	1,9	4,0	1,8	3,6	<40	49	9,2	2,0	–	115
ЮУ 3	9,4	9,3	0,4	5,2	2,1	3,7	<40	30	8,8	1,4	–	73
РАЭС 1	118	8,9	3,3	6,6	1,4	–	49,1	51,2	8,6	1,8	28,0	69,6
РАЭС 2	107	9,0	3	8,2	1,4	–	45,0	45,1	8,6	1,6	18,0	51,0
РАЭС 3	8	9,1	3,5	6,2	1,6	/0,6/	40,7	16,1	9,3	1,0	<10	56,7
РАЭС 4	114	9,1	5,7	9,1	1,6	/0,7/	42,7	31,2	8,9	2,4	26,8	124
ХАЭС 1	126,4	9,1	4,6	7,9	<1	–	41,5	27	8,7	1,2	–	32,2
ХАЭС 2	102,5	9,1	4,6	11,3	<1	–	40	11,2	8,5	1,3	–	21,5

Внедрение морфолинового и этаноламинового ВХР-2 на украинских АЭС привело к снижению концентрации железа в питательной воде в 2–3 раза (рис. 1) и повышению pH в паро-водяном контуре, что позволило значительно снизить:

- коррозионно-эрозионный износ конструкционных материалов оборудования 2 контура,
- отложения продуктов коррозии в ПГ,
- скорость деградации теплообменных трубок ПГ,
- количество химических промывок ПГ.

Применение органических аминов для коррекционной обработки рабочей среды второго контура не привело к повышению эксплуатационных затрат на химические реагенты.

Анализ эксплуатационных затрат на ведение ВХР-2 показывает (рис. 2), что:

- затраты на дозирование морфолина с избытком компенсируются уменьшением затрат на дозирование гидразина и эксплуатацию блочной очистной установки (БОУ);
- затраты реагентов на поддержание ВХР-2 в первую очередь зависят от режима работы фильтров смешанного действия (ФСД) БОУ;
- при протечках охлаждающей воды в конденсаторах турбин включаются в работу ФСД БОУ, что приводит к выводу из контура корректирующих добавок и увеличивает затраты на их дозирование.

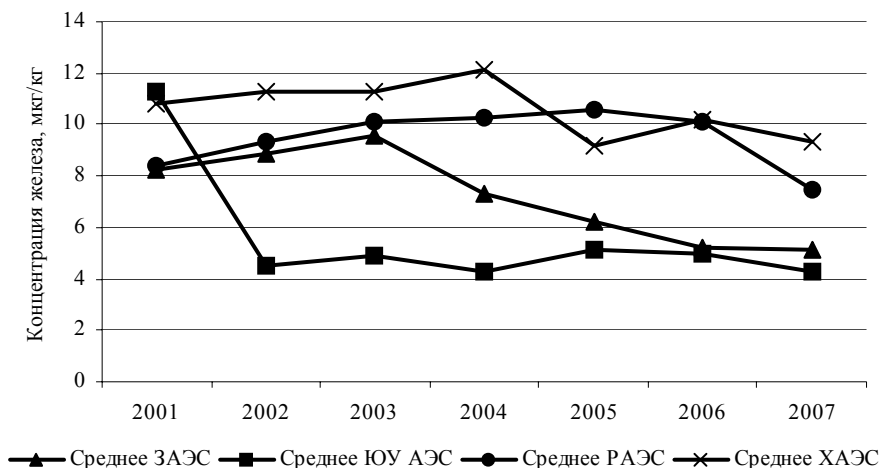


Рис. 1. Средняя концентрация железа в питательной воде ПГ

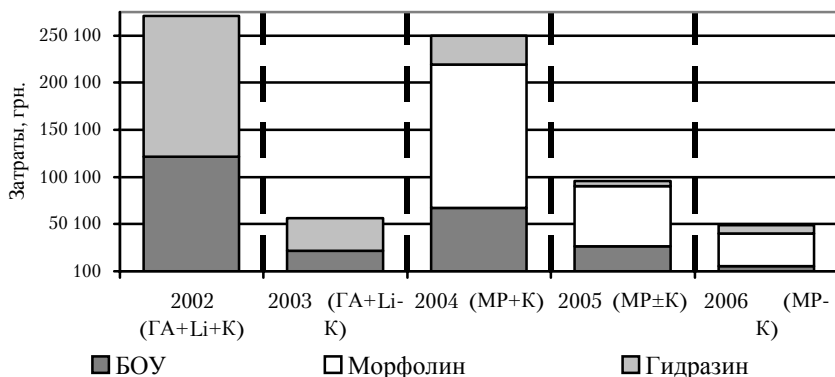


Рис. 2. Анализ эксплуатационных затрат на поддержание ВХР-2 энергоблока ВВЭР-1000:

GA+Li – гидразин-аммиачный ВХР с подщелачиванием котловой воды литием;

+K – работа преимущественно с включенными ФСД конденсатоочистки;

-K – работа преимущественно с отключенными ФСД конденсатоочистки.

Важнейшим результатом совершенствования ВХР-2 является повышение безопасности энергоблоков вследствие сохранения целостности такого важного барьера на пути распространения радиоактивных веществ, которым являются теплообменные трубки (ТОТ) ПГ.

Результаты химического контроля рабочих сред 2 контура, вихретокового контроля ТОТ ПГ, анализ результатов химических промывок и коррозионных обследований ПГ, а также количество протечек теплоносителя первого контура в ПГ (Рисунок 3) наглядно демонстрируют эффективность реализованных мероприятий по совершенствованию ВХР-2.

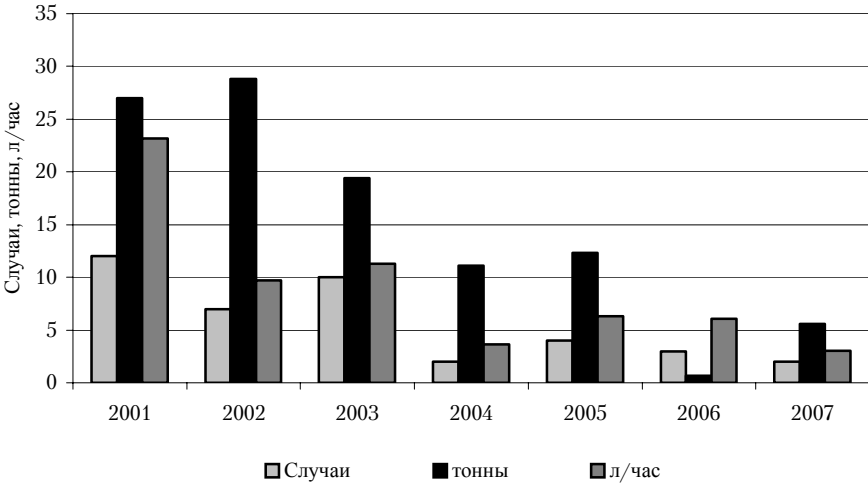


Рис. 3. Количество случаев и величина приведенной протечки ПГ на украинских АЭС

Основной экономический эффект от совершенствования ВХР-2 достигнут за счет повышения эксплуатационной надежности оборудования второго контура и, в первую очередь, ПГ. Анализ данных о количестве заглушенных трубок ПГ (Таблица 2, Рисунок 4) показывает, что для энергоблоков ХАЭС, ЗАЭС и РАЭС эта величина в 2007 году составила 0,5–3,4 трубки на один ПГ и была на довольно низком уровне в последние годы. Это позволяет прогнозировать надежную работу ТОТ ПГ не только в проектный срок эксплуатации, но и за его пределами.

Таблица 2. Количество заглушенных в течение года теплообменных трубок ПГ на украинских АЭС (в среднем на 1 ПГ)

АЭС	Количество ПГ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
ЗАЭС	24	1	1	1	2,7	1,3	2,6	12	1,5	1,4	2	1
ЮУАЭС	12	10	44	64	67	91	33	17*	18*	28*	67*	28*
РАЭС	16	7,6	22	16	70	21	7,6	3,3	3,6	1,6	7,5	3,4
ХАЭС-1	4	0	0	0	0	0,5	2,5	0	1	1	1	0,5

\* При расчете среднего значения показателя не учитывались ПГ, замененные в 2003 году (2 шт.) и в 2007 году (3 шт.).

На не замененных ПГ ЮУАЭС, которые в предыдущие годы подверглись сильному коррозионному воздействию (в 90-е годы для ЮУАЭС допускался “особенный” ВХР-2 с повышенной концентрацией коррозионно-активных примесей в воде ПГ), количество заглушаемых трубок остается значительным. Оно резко возросло в 2006 году по причине ужесточения критериев глушения трубок (а именно, доведения этого критерия до уровня энергоблоков других АЭС) и уменьшилось в 2007 году. Совершенствование ВХР-2 на ЮУАЭС позволило на 3–4 года отсрочить замену ПГ на энергоблоке №1.

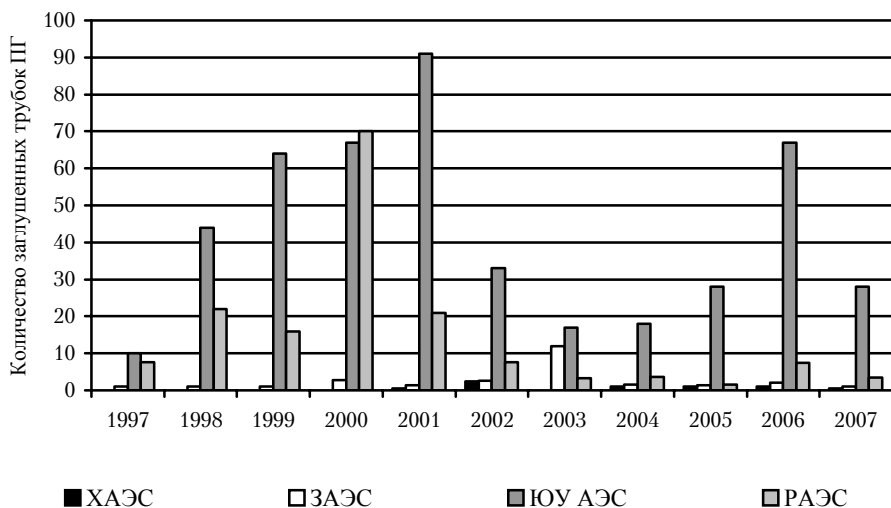


Рис. 4. Количество заглушенных в течение года трубок ПГ на украинских АЭС (в среднем на 1 ПГ)

На всех АЭС во время останова энергоблоков производится изучение процесса “hide-out return” в ПГ и его использование для вывода накопившихся в ПГ солей (Рисунки 5,6).

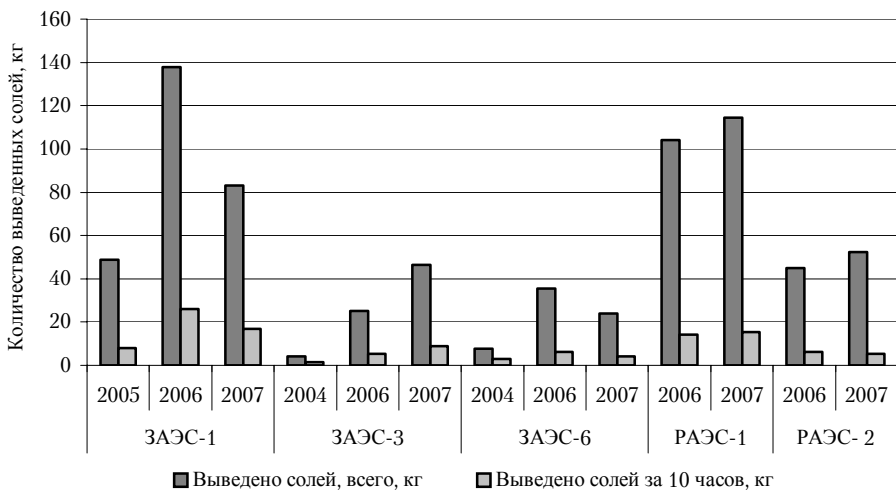


Рис. 5. Вывод солей с продувочной водой ПГ в процессе “hide-out return” (менее 20 кг)

Основными факторами, способствующими накоплению солей в ПГ при прочих равных условиях, являются:

- наличие шламов в ПГ;
- концентрирование солей в котловой воде во время работы энергоблока на мощности.

Поэтому использование процесса “hide-out return” в ПГ позволяет не только снизить количество накопившихся солей в ПГ, но и оценить состояние “целевого ВХР” в зонах концентрирования солей, а также вероятность протекания подшламовой коррозии. Для ПГ, в которых в процессе “hide-out return” выводится большое количество солей, целесообразно проводить химическую промывку с целью уменьшения риска подшламовой коррозии.

Несмотря на значительное сокращение количества протечек в ПГ и количества заглушаемых трубок ПГ, эти явления по-прежнему имеют место и требуют дальнейшего совершенствования ВХР-2.

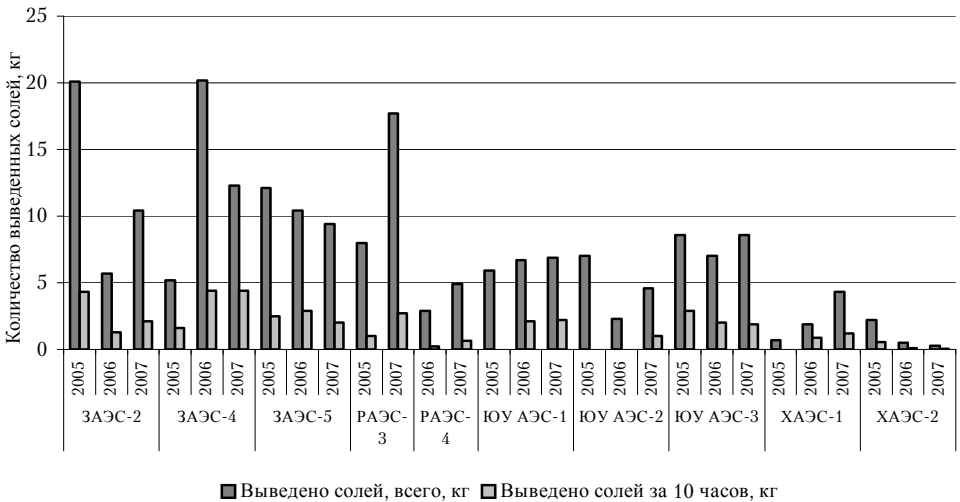


Рис. 6. Вывод солей с продувочной водой ПГ в процессе “hide-out return” (более 20 кг)

Сравнение состояния ВХР-2 на украинских АЭС с ВХР-2 западных двухконтурных АЭС позволяет сделать следующие выводы.

Для АЭС с медьсодержащими сплавами во втором контуре:

- концентрация железа в питательной воде на украинских АЭС при коррекционной обработке органическими аминами составляет 4–5 мкг/кг, а на французских АЭС компании “Электрисите де Франс” (ЭДФ) – 1–2 мкг/кг;
- значения pH рабочих сред 2 контура на украинских и западных АЭС практически одинаковы (9,1–9,3). Однако, включение ФСД БОУ на украинских АЭС при присосах охлаждающей воды приводит к выводу из контура корректирующих аминов и снижению pH (на двухконтурных АЭС компании “Электрисите де Франс” БОУ отсутствуют);
- концентрация коррозионно-активных примесей в продувочной воде ПГ на украинских АЭС на порядок выше, чем на западных АЭС. Причиной этого являются неплотные конденсаторы и недостаточно высокое качество химически обессоленной воды. Электропроводимость воды на украинских АЭС составляет 0,12–0,13 мкСм/см, а на западных АЭС – 0,06–0,07 мкСм/см.

Для АЭС без медьсодержащих сплавов во втором контуре (в Украине в настоящее время таковых нет) характерны:

- низкая концентрация железа в питательной воде, не более 1 мкг/кг;
- высокие значения рН в рабочих средах второго контура – 9,6–9,8;
- низкая концентрация коррозионно-активных примесей в продувочной воде ПГ – на уровне единиц мкг/кг.

Эффективными методами улучшения ВХР-2 энергоблоков ВВЭР являются:

- удаление медьсодержащего оборудования из второго контура, включая замену конденсаторов на плотные титановые или нержавеющие;
- реконструкция ХВО с целью улучшения качества обессоленной воды и снижения поступления примесей во второй контур с подпиточной водой.

При принятии решения о замене конденсаторов необходимо обеспечить их плотность и коррозионную стойкость, как со стороны второго контура, так и со стороны охлаждающей технической воды, что особенно важно для ЮУ АЭС с высоким солесодержанием охлаждающей воды. В то же время следует учитывать, что медь является эффективным гербицидом, и поэтому отсутствие контакта технической воды с медью может привести к усиленному биологическому обрастанию замкнутых систем технического водоснабжения. В условиях прудов-охладителей (ХАЭС, ЮУАЭС, ЗАЭС) борьба с биологическим обрастанием оборудования будет очень проблематична. Поэтому специалисты ЭДФ рекомендуют рассмотреть возможность использования комбинированных конденсаторов: две трети – из титана или нержавеющей стали, одна треть – из медных сплавов, но без ущерба для плотности конденсаторов. При невозможности замены медьсодержащего оборудования во втором контуре применение органических аминов является эффективным компенсирующим мероприятием для поддержания нормативного качества рабочих сред второго контура.

До замены конденсаторов на плотные и реконструкции ХВО необходимо реализовывать следующие компенсирующие меры по улучшению ВХР-2:

- применять органические амины во втором контуре на всех энергоблоках;
- повышать плотность конденсаторов путем нанесения защитных покрытий;
- разрабатывать и совершенствовать методы ранней диагностики, поиска и устранения присосов охлаждающей воды;
- сокращать количество подпиточной воды;
- проводить химические промывки ПГ при большом количестве выводимых солей во время останова (“hide-out return” более 40 кг на протяжении 2–3 лет).

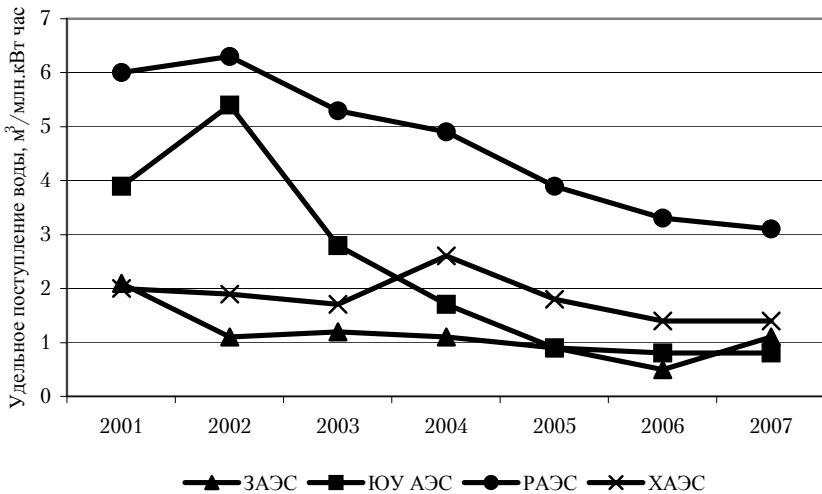
## **НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВХР ПЕРВОГО КОНТУРА**

На украинских АЭС обеспечивается стабильное ведение ВХР первого контура (Таблица 3). Отложений продуктов коррозии на конструкционных элементах тепловыделяющих сборок (ТВС) не наблюдалось. Отклонения качества теплоносителя от установленных норм были в пределах первого уровня действия и устранялись в течение установленного действующими нормативами времени.

Существующие сегодня на украинских АЭС системы контроля и поддержания ВХР-1 обеспечивают безопасную и надежную работу оборудования и материалов первого контура. Однако на украинских АЭС образуется значительное количество жидких радиоактивных отходов (Рисунок 7) и растут мощности дозы излучения от оборудования первого контура (Рисунок 8).

Таблица 3. Средние значения показателей качества теплоносителя первого контура в 2007 году

Энерго-блок	Показатели качества теплоносителя						
	$H_2BO_3$	K+Na+Li	Cl	$O_2$	$NH_3$	$H_2$	Fe
	г/дм <sup>3</sup>	ммоль/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>
Нормы		0,036-0,5	<0,1	<0,005	>3,0	2,2-4,5	<0,005
ЗАЭС 1	3,4	0,24	<0,04	0,0001	11,1	2,7	0,005
ЗАЭС 2	3,4	0,25	<0,04	0,0002	8,7	2,5	0,005
ЗАЭС 3	2,9	0,23	<0,04	<0,005	10,2	2,3	0,005
ЗАЭС 4	3,3	0,25	<0,04	<0,005	12,7	2,5	0,005
ЗАЭС 5	3,3	0,24	<0,04	0,0003	10,7	2,5	0,004
ЗАЭС 6	3,7	0,26	<0,04	0,0002	11,8	2,5	0,005
ЮАЭС 1	3,1	0,22	<0,04	<0,005	12,2	2,8	0,007
ЮАЭС 2	2,9	0,21	<0,04	<0,005	11,4	2,6	0,006
ЮАЭС 3	2,9	0,20	<0,04	<0,005	12,1	2,5	0,005
РАЭС 1	2,6	0,23	<0,04	<0,005	11,8	2,9	0,010
РАЭС 2	2,5	0,22	<0,04	<0,005	11,9	3,6	0,01
РАЭС 3	3,7	0,27	≤0,04	<0,005	11,4	2,4	0,017
РАЭС 4	3,5	0,24	≤0,04	<0,005	12,5	2,3	0,024
ХАЭС 1	3,7	0,3	<0,04	<0,005	14,1	2,3	0,011
ХАЭС 2	3,1	0,2	<0,04	<0,005	11,5	2,3	0,004

Рис. 7. Удельное поступление радиоактивно загрязненной воды на очистные установки спецкорпуса на единицу выработанной АЭС электроэнергии, м<sup>3</sup>/млн.кВт.час

Опыт организации ВХР 1 контура на западных АЭС с реакторами типа PWR показывает возможность уменьшения количества РАО и мощности дозы излучения от оборудования путем модернизации ВХР-1 АЭС с ВВЭР в таких основных направлениях:

- переход на дозирование газообразного водорода в первый контур вместо аммиака;
- дозирование цинка в первый контур;
- применение борной кислоты, обогащенной по изотопу <sup>10</sup>B.



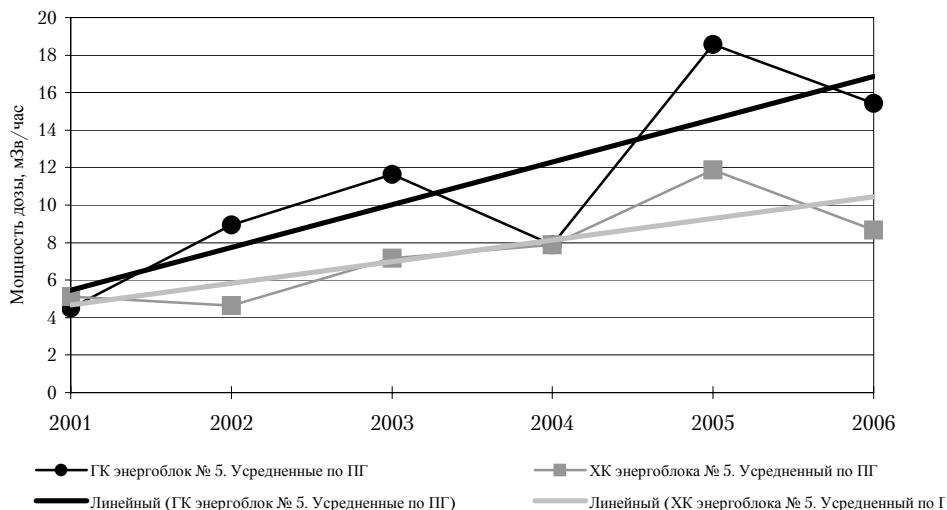


Рис. 8. Мощность дозы излучения от горячего (ГК) и холодного (ХК) коллекторов энергоблока ЗАЭС-5 (ПГ УВ10-40W01)

### Дозирование газообразного водорода в первый контур

Согласно действующим нормам ВХР 1 контура концентрация растворённого водорода в теплоносителе должна поддерживаться в диапазоне 2,2–4,5 мг/дм<sup>3</sup>. Это необходимо для подавления образования окислительных продуктов радиолитического разложения теплоносителя в активной зоне, поддержания концентрации растворённого кислорода менее 0,005 мг/дм<sup>3</sup> и обеспечения тем самым необходимых условий для максимально возможного снижения скорости коррозии компонентов 1 контура. На АЭС с реакторами ВВЭР водород образуется за счёт разложения аммиака, дозируемого в 1 контур.

При этом возникают проблемы эксплуатации и образования большого количества жидких радиоактивных отходов.

Проблемы эксплуатации энергоблоков ВВЭР, обусловленные дозированием аммиака, заключаются в следующем:

- процесс образования водорода из аммиака при пусках энергоблока замедлен и затрудняет достижение нормируемых концентраций водорода;
- в период пусков и при переходных режимах изменения мощности сложно поддерживать требуемую концентрацию водорода, поскольку образование водорода пропорционально нейтронному потоку в активной зоне реактора;
- в теплоноситель 1 контура с вводимым аммиаком поступают вредные примеси. Отдельные химические элементы, активируясь в реакторе, повышают активность теплоносителя;
- перед вскрытием 1 контура для проведения ремонтных работ необходимо длительно вентилировать оборудование для удаления водорода, который образуется из аммиака;
- при вводе аммиака возникают всплески концентрации щелочных металлов и активности теплоносителя.

Из-за насыщения аммиаком снижается эффективность работы ионообменных фильтров байпасной очистки теплоносителя 1 контура по удалению коррозионных ионов и возникает необходимость проведения частой регенерации фильтров для восстановления их ионообменной способности. Это, в свою очередь, приводит к увеличению количества регенерационных растворов. В выпарных аппаратах СВО аммиак не полностью удаляется с газовыми сдвухами и циркулирует по технологической цепочке переработки жидких РАО. Все это приводит к увеличению количества радиоактивно загрязненных регенерационных растворов, поступающих в итоге в РАО.

На западных АЭС с реакторами PWR необходимая концентрация водорода в 1 контуре поддерживается путём ввода газообразного водорода непосредственно в деаэратор подпитки, что позволяет избежать всех указанных выше проблем. Поэтому в настоящее время на ЮУАЭС рассматривается возможность перехода на дозирование газообразного водорода в теплоноситель 1 контура вместо аммиака. Дозирование газообразного водорода в первый контур требует изменения в составе оборудования первого контура и эту технологию предполагается реализовать на пилотном блоке ЮУ АЭС.

### Дозирование цинка в первый контур

Цинк оказывает влияние на оксидные пленки, образующиеся на поверхности коррозионно-стойкой стали, и приводит к увеличению доли оксидов типа шпинели. Сам цинк образует шпинель с более высокими защитными свойствами, чем шпинели, образованные другими двухатомными катионами. Цинк и кобальт конкурируют при заполнении катионных вакансий в решетке шпинели. Поэтому при концентрации цинка в теплоносителе 15 мкг/л катионные вакансии преимущественно занимает цинк, чем препятствует проникновению кобальта в шпинель. Шпинель с заполненными цинком катионными вакансиями препятствует диффузии других катионов к поверхности металла, и, тем самым, замедляет коррозию хромоникелевой аустенитной стали.

Учитывая, что вклад радиоактивных изотопов кобальта в общую активность составляют от 50% для реакторов типа ВВЭР и до 90% для реакторов типа PWR, замещение кобальта на цинк приводит к снижению активности пленки окислов.

Кобальт активируется в активной зоне реактора по реакции  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 5,272$  лет по схеме  $^{60}\text{Ni} + \beta^- + \gamma$ .

Для снижения активации самого цинка в теплоноситель первого контура дозируют цинк, обедненный по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ , который активируется в контуре по реакции  $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 244,3$  дня по схеме  $^{65}\text{Cu} + \beta^+ + \epsilon + \gamma$ .

Концентрация цинка 5–15 мкг/дм<sup>3</sup> обеспечивают минимизацию радиационных полей от оборудования первого контура. Так средняя мощность дозы излучения от горячих коллекторов ПГ энергоблока № 5 ОП ЗАЭС (Рисунок 8) увеличилась с 2001 по 2006 год в 3,4 раза (с 4,5 до 15,4 мЗв/час). В связи с этим возникла необходимость реализации мероприятий, направленных на снижение, или, хотя бы, на стабилизацию мощности дозы излучения от оборудования первого контура.

Одним из таких мероприятий может быть дозирование цинка в теплоноситель первого контура. Эта технология в настоящее время широко

применяется на АЭС с реакторами типа PWR, но пока отсутствует опыт ее реализации на АЭС с реакторами типа ВВЭР.

В результате выполненных на АЭС “Библис” (Германия) мероприятий по дозированию цинка мощность дозы излучения от оборудования первого контура снижается примерно на 10% в год. Так, средняя мощность дозы излучения от горячих коллекторов ПГ энергоблока “Б” АЭС “Библис” снизилась с 1997 по 2007 год в 2 раза.

### **Применение борной кислоты, обогащенной по изотопу В-10**

Используемая на АЭС с ВВЭР для борного регулирования борная кислота содержит атомы бора в природном соотношении изотопов и содержит 18,5–20 % изотопа  $^{10}\text{B}$ , поглощающего нейтроны. Фактически в теплоносителе поглотителем нейтронов является изотоп  $^{10}\text{B}$ .

Концентрация щелочных добавок в теплоносителе водо-водяных энергетических реакторов поддерживается в зависимости от текущей концентрации борной кислоты для поддержания высокотемпературного рН на оптимальном уровне с целью уменьшения скорости коррозии конструкционных материалов и массопереноса продуктов коррозии.

При применении ядерного топлива с более высоким обогащением, использовании МОХ топлива и внедрении удлиненных топливных циклов концентрация борной кислоты, необходимая для поддержания нормируемой подкритичности реактора, увеличивается. В определенный момент она достигает значений, при которых кислотность не может быть скомпенсирована щелочными добавками без опасности повреждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) или образования отложений на оболочках ТВЭЛов.

Вероятность повреждения оболочек ТВЭЛов может быть снижена за счет оптимизации ВХР-1 при использовании обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B}$  борной кислоты. Обогащение борной кислоты изотопом  $^{10}\text{B}$  до 28–30 % позволяет почти на 50 % снизить концентрацию борной кислоты, требуемую для поддержания заданной подкритичности.

Применение обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B}$  борной кислоты дает следующие преимущества:

- уменьшение концентрации щелочных металлов и, соответственно, снижение риска коррозии оболочек ТВЭЛов;
- поддержание величины высокотемпературного рН в оптимальном диапазоне в течение всего топливного цикла;
- улучшение управления режимами использования ядерного топлива;
- снижение количества примесей, попадающих в теплоноситель первого контура с дозируемыми корректирующими реагентами;
- снижение количества жидких РАО.

На АЭС “Эмсланд” (Германия) был составлен и реализован график перехода на обогащенную борную кислоту, рассчитанный на три месяца.

После смешения в емкостях расчетного количества борной кислоты с обогащением 95–99 % по  $^{10}\text{B}$  с раствором, находившимся в емкости, и перемешивания производился контроль общего содержания бора и изотопа  $^{10}\text{B}$ . Таким образом, во всех емкостях систем безопасности, бассейнах выдержки, воде первого контура и др. были получены растворы борной кислоты, содержащие одинаковую долю изотопа  $^{10}\text{B}$  равную 28 %.

## ВЫВОДЫ

В последние годы на украинских АЭС выполнены следующие мероприятия по совершенствованию ВХР-2 контура:

- внедрена коррекционная обработка рабочей среды второго контура органическими аминами;
- снижены концентрации кислорода в конденсате и питательной воде;
- производится подщелачивание котловой воды гидроокисью лития;
- усовершенствованы системы химического контроля ВХР-2;
- осуществляется контроль и использование процесса “hide-out return” для вывода солей из ПГ.

Эти мероприятия позволили в значительной мере повысить безопасность, надежность и экономичность эксплуатации оборудования второго контура энергоблоков АЭС.

Для дальнейшего совершенствования ВХР второго контура и доведения его до современного уровня, достигнутого на западных энергоблоках типа PWR необходимо:

- удалить медьсодержащее оборудование из второго контура ВВЭР, в том числе заменить конденсаторы на плотные титановые или нержавеющие;
- выполнить реконструкцию ХВО для улучшения качества обессоленной воды и снизить поступление примесей во второй контур с подпиточной водой.

До замены конденсаторов на плотные и реконструкции ХВО необходимо реализовывать компенсирующие меры по улучшению ВХР-2:

- применять органические амины во втором контуре на всех энергоблоках;
- повышать плотность конденсаторов путем нанесения защитных покрытий;
- разрабатывать и совершенствовать методы ранней диагностики, поиска и устранения присосов охлаждающей воды;
- сокращать количество подпиточной воды;
- проводить химические промывки ПГ при большом количестве выводимых во время останова солей.

Существующая сегодня на АЭС система контроля и поддержания ВХР-1 обеспечивает безопасную и надежную работу оборудования и конструкционных материалов первого контура. Однако, опыт эксплуатации западных АЭС с реакторами типа PWR показывает, что путем совершенствования ВХР-1 можно достичь значительного уменьшения образования количества жидких РАО и снижения мощности доз излучения от оборудования первого контура. Это особенно важно в условиях эксплуатации стареющих энергоблоков и для продления срока их эксплуатации.

Наиболее перспективными для украинских АЭС представляются такие направления совершенствования ВХР-1:

- внедрение дозирования цинка в первый контур;
- переход на дозирование газообразного водорода в первый контур вместо аммиака;
- применение борной кислоты, обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B}$ .

Технология дозирования цинка малозатратна, достаточно легко реализуется и может быть опробована на пилотном энергоблоке ЗАЭС.

Дозирование газообразного водорода в первый контур требует изменения в составе оборудования первого контура и может быть реализована после соответствующей подготовки на пилотном энергоблоке ЮУАЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. “Программа реконструкции и модернизации оборудования химических цехов и совершенствования химических технологий на 2008-2011 года”, утвержденная первым вице-президентом – техническим директором НАЭК “Энергоатом” 03.12.2007 г.
2. ГНД 95.1.06.02.001-02 “Теплоноситель первого контура ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000. Технические требования. Способы обеспечения качества”.
3. ГНД 95.1.06.02.002-04 “Водно-химический режим второго контура атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР. Технические требования к качеству рабочей среды. Коррекционная обработка гидразин-гидратом, морфолином, гидроокисью лития”.
4. Материалы 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. 01–06.10.2000 г. – Подольск, ОКБ Гидропресс. – 2006.
5. Годовой отчет по основной деятельности химических цехов. НАЭК “Энергоатом”, 2008 год.
6. Годовой отчет по оценке текущего уровня эксплуатационной безопасности за 2007 год. Раздел 4.5 “Водно-химический режим”. НАЭК “Энергоатом”, 2008 год.
7. Материалы семинара “Оптимизация ВХР путем дозирования цинка в теплоноситель”.
8. Оптимизация ВХР путем обогащения борной кислоты бором-10 на АЭС Библис по программе TACIS U1.03/06. – Май 2008 года.
9. Анализ опыта эксплуатации ВХР-2 с коррекционной обработкой рабочей среды гидроокисью лития и морфолином с точки зрения влияния на надежность оборудования и затрат на поддержание. Отчет по этапу №1 План-Заказа № 010-03-06/41 ОП НТЦ НАЭК “Энергоатом”. – 2006.
10. L.Millet. Secondary water treatment optimization in French PWRs. Recent ways of investigation. – International conference “Chemistry in water reactors”, SFEN, Avignon, France. – 22–26 April 2002.
11. I.Smiesko, J.Bystriansky, A.Szalo. Use of ethanolamine for alkalization of secondary coolant first experience at VVER reactor. – IAEA CRP on DAWAC. Smolenice, Slovakia. – 20–23 November 2001.
12. K. K. Park, J. B. Lee and S. W. Yoon Korea Electric Research Institute. “ETA Chemistry Experience and Assessment on CPP in Korea”, SFEN, Avignon, France. – 22–26 April 2002.