

УДК 629.5.03:621.039+629.561.5
EDN: LEMIDC

Б.И. Добрин, Ю.Н. Мясников, Е.Н. Чеботарёв
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕДУР КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВТОРОГО КОНТУРА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОРСКОГО СУДНА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является водно-химический режим второго контура ядерной энергетической установки (ЯЭУ) атомных ледоколов. Цель – формирование задач дальнейшего совершенствования контрольных процедур поддержания бескоррекционного водно-химического режима (ВХР), обеспечивающего безаварийную эксплуатацию атомных ледоколов.

Материалы и методы. Ретроспективный анализ 50-летнего опыта эксплуатации атомных ледоколов.

Основные результаты. Принятый бескоррекционный нейтральный водно-химический режим парогенерирующего контура, основанный на глубокой очистке питательной воды от солей, продуктов коррозии и растворенного кислорода путем деаэрации и включения в конденсатно-питательную систему ионитных фильтров (обессоливающих или натрий-катионитовых), обеспечил антикоррозионный режим в парогенераторе, связывающем контуры теплоносителя и рабочего тела. Несмотря на совершенствование систем централизованного контроля, процедуры контроля качества воды останулись в развитии, и на современных ледоколах приняты практически без изменений.

Заключение. Системы централизованного контроля ледоколов нового поколения дополнены программно-аппаратным комплексом технического диагностирования (ПАК ТД) оборудования ЭУ. ПАК ТД позволяет формализовать решение наиболее ответственных задач по поддержанию ВХР второго контура и вывести оператора в параллельную цепочку автоматизированного контроля ВХР конденсатно-питательной системы (КПС). Программно-алгоритмический модуль в первом приближении должен включать формализацию наиболее ответственных задач ВХР, решаемых операторами: регистрация текущей информации солемеров, ее хранение и представление по вызову на дисплей (графопостроитель), что позволяет в реальном масштабе времени следить за динамикой изменения соледержания в КПС; поиск причин засоления контура при срабатывании предупредительной и аварийной сигнализации с выдачей на дисплей ПАК ТД информации о причинах нарушения ВХР и рекомендации по их локализации в словесно-рекомендательной форме.

Ключевые слова: водно-химический режим, ионитный фильтр, второй контур ядерной энергетической установки, парогенератор, соледержание.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.03:621.039+629.561.5
EDN: LEMIDC

В.Е. Dobrin, Yu.N. Myasnikov, E.N. Chebotarev
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

WATER CHEMISTRY REGIME AND IMPROVEMENT OF SECONDARY WATER QUALITY CONTROL IN NUCLEAR POWERPLANT OF SEA-GOING SHIP

Для цитирования: Добрин Б.И., Мясников Ю.Н., Чеботарёв Е.Н. Водно-химический режим и совершенствование процедур контроля качества воды второго контура ядерной энергетической установки морского судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 87–95.

For citations: Dobrin В.Е., Myasnikov Yu.N., Chebotarev E.N. Water chemistry regime and improvement of secondary water quality control in nuclear powerplant of sea-going ship. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 87–95 (in Russian).

Object and purpose of research. The object of research is water chemistry regime of the secondary water in nuclear powerplants (NPP) aboard nuclear icebreakers. The purpose is further improvement of control procedures to maintain correction-free water chemistry conditions for ensuring fail-safe operation of nuclear icebreakers.

Materials and methods. Lookback analysis of 50-year experience with operation of nuclear icebreakers.

Main results. The correction-free neutral water chemistry regime adopted for the steam-generating circuit based on fine feed water purification of salts, corrosion products and dissolved oxygen by de-aeration and ion-exchange (demineralizing or No-cation) filters in the condensate-feeding system provided anti-corrosion conditions in the steam generator connecting coolant and working fluid circuits. In spite of improvements in the centralized control systems, water quality control procedures in modern icebreakers are adopted as they are without much refinement.

Conclusion. The centralized control systems in icebreakers of new generation are added with a complex of hardware/software diagnostic tools (HSDC) for monitoring the powerplant installation. HSDT is used to formalize the most critical tasks in maintenance of the secondary water chemistry regime (WCR) and put operator in a parallel chain of computer-assisted control in the condensate-feeding system (CFS). In the first approximation the software & algorithm module should provide formalization of the most critical WCR tasks undertaken by operators: recording of on-line data from salt gages, storage and output of the data to display unit or plotter, whichever is requested, for real-time monitoring of changes in salt content in CFS; finding causes of excessive salt in the loop at activation of the warning & alarm signals with output of trouble-shooting data on the HSDC display with advices on WCR remedy formulated in words.

Keywords: water chemistry regime, ion exchange filter, secondary circuit of nuclear powerplant, steam generator, salt content.

The authors declare no conflicts of interest.

Атомному ледокольному флоту России – более полувека. Положительный опыт эксплуатации судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) показал не только удовлетворительную надежность судового оборудования, но и радиационную безопасность реакторной установки (РУ) [1].

За время эксплуатации атомных ледоколов не произошло ни одной аварии, связанной с радиоактивным загрязнением окружающей среды. Это главный вопрос, который в свое время волновал общественность, когда речь заходила об использовании атомной энергии в судовых условиях. Сегодня жители северных районов «не замечают» атомных ледоколов, а ведь когда-то атомному лихтеровозу «Севморпуть» не разрешили зайти во Владивосток.

О чем это говорит? Во-первых, принятые проектантом конструктивные решения по обеспечению надежности и ядерной безопасности оборудования оказались удачными, несмотря на уникальность создаваемого оборудования.

Во-вторых, принятый бескоррекционный нейтральный водно-химический режим (ВХР) парогенерирующего контура, основанный на глубокой очистке питательной воды от солей, продуктов коррозии и растворенного кислорода путем деаэрации и включения в конденсатно-питательную систему ионитных фильтров (обессоливающих или натрий-катионитовых), обеспечил антикоррозионный режим в парогенераторе (ПГ), связывающем контуры теплоносителя и рабочего тела (рис. 1).

Качество воды определяет интенсивность коррозионных процессов и накипеобразования на по-

верхностях нагрева. Поэтому нормативными документами, разработанными в т.ч. Крыловским государственным научным центром (ОСТ В5.4318.80), установлены жесткие требования к концентрации солей в питательной воде ПГ. Показатели качества воды первичного заполнения второго контура должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.

При соответствии качества воды требованиям норм происходит незначительное накопление в ПГ солей, т.к. большинство растворенных соединений выносятся в контур вместе с паром. Появляющиеся в ПГ небольшие солевые отложения из-за наличия в питательной воде микроколичеств ионов, проскакивающих через ионитный фильтр, и продуктов ионообменных смол легко удаляются из ПГ при расхолаживании установки в процессе промывки тракта влажным паром.

Поддержание требуемого ВХР в конденсатно-питательной системе (КПС) обеспечивается разветвленной системой штатных автоматических приборов – солемеров и корабельных водно-химических лабораторий (ВХЛ). Солемеры работают в онлайн-режиме и снабжены предупредительной (ПС) и аварийной (АС) сигнализацией. ПС включается при превышении нормы по содержанию воды более 1 мг/л и требует от оператора определения причины ее срабатывания в реальном масштабе времени. АС срабатывает при засолении КПС 300 мг/л, но уже с выводом энергетической установки из действия с последующим установлением и устранением источника засоления и отмывкой КПС.

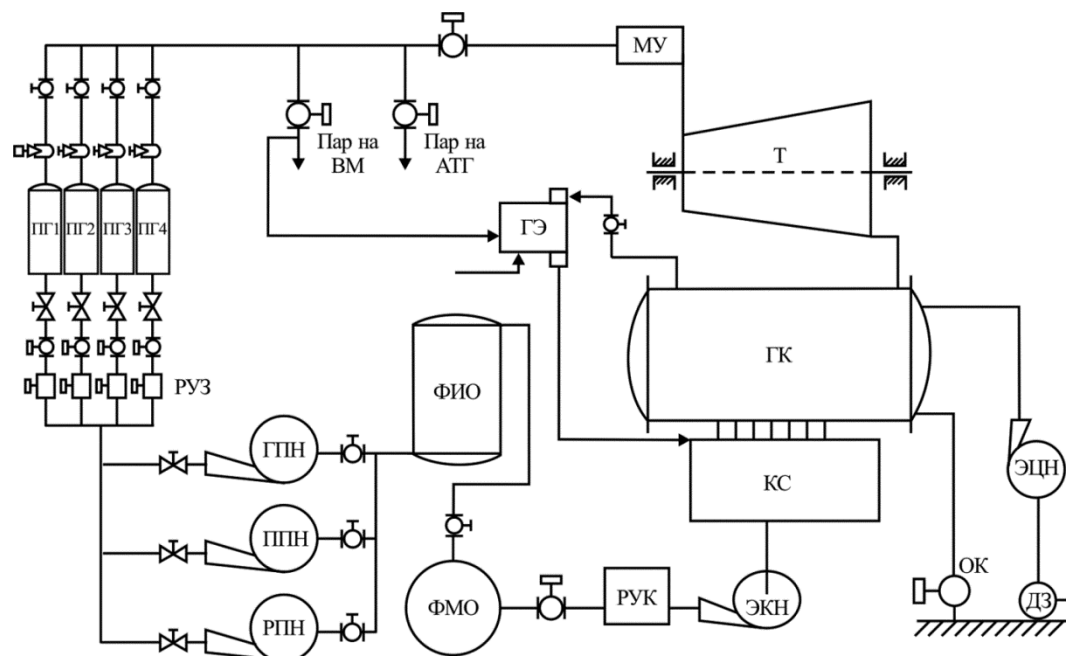


Рис. 1. Принципиальная схема второго контура ядерной энергетической установки.

Здесь: РУЗ – устройство системы управления, регулирования и защиты; ПГ – парогенератор; МУ – маневровое устройство; Т – турбина; ГК – главный конденсатор; ГЭ – главный эжектор; КС – конденсатосборник; ЭЦН – электроциркуляционный насос; ЭКН – электроконденсатный насос; РУК – регулятор уровня конденсата; ФМО – фильтр механической очистки; ФИО – фильтр ионообменный; ГПН – главный питательный насос; ППН – пусковой питательный насос; РПН – резервный питательный насос; ВМ – вспомогательные механизмы; АТГ – автономный турбогенератор; ОК – отливной клапан; ДЗ – донная задвижка; – клапан с дистанционным управлением; – невозвратный клапан; – паровая задвижка с электроприводом; – ручной запорный клапан; – донная задвижка

Fig. 1. Layout of nuclear powerplant secondary circuit. РУЗ – control, regulation & safety system; ПГ – steam generator; МУ – maneuvering gear; Т – turbine; ГК – main condenser; ГЭ – main ejector; КС – condensate tank; ЭЦН – motor-driven circulating pump; ЭКН – motor-driven condensate pump; РУК – condensate level regulator; ФМО – mechanical cleaning filter; ФИО – ion exchange filter; ГПН – main feed pump; ППН – starting feed pump; РПН – auxiliary feed pump; ВМ – auxiliary machinery; АТГ – self-contained turbo generator; ОК – discharge valve; ДЗ – bottom valve; – remote-control valve; – nonreturn valve; – steam valve; – manually locked valve; – bottom valve

Таблица 1. Показатели качества воды

Table 1. Water quality indications

№ п/п	Нормируемый показатель	Усл. обозн.	Значение показателя			
			Вода первич. заполнения	Добавочная вода	Вода до фильтров	Вода на входе в ПГ
1	Общее солесодержание по NaCl, мг/л:	с/с	0,5	1,0	0,3	0,2
	▪ нормальное					
2	Удельная электропроводность при 20 °С, С _м /м:	σ	1,0	2,0	0,6	0,4
	▪ нормальная					
3	Содержание ионов хлора, мг/л:	Cl	0,05	0,05	0,05	0,02
	▪ предельное					

На действующих ЯЭУ атомных судов для измерения соледержания используются солемеры: СПИ02 (а/л «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы» проекта 10521); СПИ07-01 и СПИ07-02 (атомный лихтеровоз «Севморпуть» проекта 10081). Названные комплекты солемеров предназначены для непрерывного преобразования соледержания условно по NaCl в линейный унифицированный сигнал напряжения постоянного тока в диапазоне 0–10 в (СПИ02) и 0–5 в (СПИ07-01, СПИ07-02).

В табл. 2 приведены основные метрологические характеристики используемых солемеров. Принцип действия комплектов солемеров основан на измерении удельной электрической проводимости водных растворов. Удельная электропроводимость контролируемого раствора в чувствительном элементе преобразуется в напряжение постоянного тока, значение которого пропорционально соледержанию раствора. Перечень мест установки солемеров на атомных ледоколах проекта 10521 и 10081 приведен в табл. 3, 4.

ВХЛ ПТ-Р и ее модификации (далее ВХЛ) отечественного производства позволяют проводить периодические измерения в бортовых условиях показателей качества воды высокой чистоты (ВВЧ) второго контура ЯЭУ. Функционально ВХЛ состоит из трех приборов: концентратомера, кислородомера и хлоридомера, объединенных в электрическую и гидравлическую схемы на общей несущей раме.

Принцип действия концентратомера основан на измерении активной составляющей переменного поляризуемого тока между измерительными электродами кондуктометрической ячейки и преобразовании ее с учетом температурной составляющей сигнала в соответствующее значение концентрации растворенной соли (условно по хлористому натрию).

Кислородомер основан на измерении в потенциометрическом режиме предельного диффузионного тока восстановления молекулярного кислорода между рабочими электродами мембранной амперометрической ячейки и преобразовании его с учетом температурной компенсации сигнала в соответствующее значение концентрации растворенного кислорода.

Хлоридомер основан на измерении в режиме нулевого тока электродвижущей силы гальванического элемента, состоящего из двух мембранных ион-селективных электродов и преобразовании ее в соответствующие значения концентрации хлорид-ионов.

Система солемеров, работающих в онлайн-режиме, и мобильная ВХЛ контролируют следующие показатели качества воды КПС:

- общее соледержание;
- содержание ионов хлора;
- содержание железа;
- содержание меди;
- водородный показатель (рН);
- содержание растворенных газов (кислород).

Общее соледержание (удельная электропроводимость) воды является универсальным показателем, характеризующим наличие примесей и коррозионную агрессивность воды для парогенераторов с трубной системой из любых материалов. Содержание в воде ионов хлора (наиболее коррозионно-агрессивный агент) контролируется периодически (ВХЛ) по всему конденсатно-питательному тракту с целью проверки правильности показаний солемеров и при поиске источника поступления солей в КПС.

Содержание продуктов коррозии железа и меди включено в состав нормируемых показателей из-за их влияния на процессы накипеобразования

Таблица 2. Метрологические характеристики солемеров

Table 2. Metrological characteristics of salt gages

№ п/п	Измеряемый параметр	Тип солемера		
		СПИ02	СПИ07-01	СПИ07-02
1	Диапазон измерений NaCl, мг/л	0,1–2,0	0,1–2,0 0,2–4,0 5,0–100	0,1–2,0
2	Основная погрешность, %	5	5	5
3	Параметры контролируемой среды: ▪ давление, мПа ▪ температура, °С	0–10 2–100	0–10 2–100	0–10 100–180

Таблица 3. Перечень мест установки датчиков солемеров СПИО2

Table 3. List of СПИО2 salt gage locations

№ п/п	Функционально-самостоятельный элемент второго контура и измеряемый параметр	Значение измеряемого параметра		Индикация (центральное табло, дисплей, регистрация)
		номинальное значение	уставка ПС	
1	Главный турбогенератор № 1:			
	▪ солесодержание конденсата на линии подпитки от основного запаса и теплого ящика;	0,5 мг/л	1,0 мг/л	ЦТ6, дисплей
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 1;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ6, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 3;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ6, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 5;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ6, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата в главном конденсаторе	0,5 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ6, дисплей, регистрация
2	Главный турбогенератор № 2:			
	▪ солесодержание конденсата на линии подпитки от основного запаса и теплого ящика;	0,5 мг/л	1,0 мг/л	ЦТ7, дисплей
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 2;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ7, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 4;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ7, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата после ИФ – 6;	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦТ7, дисплей, регистрация
	▪ солесодержание конденсата в главном конденсаторе	0,5 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ7, дисплей, регистрация
3	Вспомогательный турбогенератор № 1:			
▪ солесодержание конденсата во вспомогательном конденсаторе	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ5, дисплей, регистрация	
4	Вспомогательный турбогенератор № 2:			
▪ солесодержание конденсата во вспомогательном конденсаторе	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ5, дисплей, регистрация	
5	Вспомогательный турбогенератор № 3:			
▪ солесодержание конденсата во вспомогательном конденсаторе	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ8, дисплей, регистрация	
6	Вспомогательный турбогенератор № 4:			
▪ солесодержание конденсата во вспомогательном конденсаторе	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ8, дисплей, регистрация	
7	Вспомогательный турбогенератор № 5:			
▪ солесодержание конденсата во вспомогательном конденсаторе	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ8, дисплей, регистрация	
8	Стояночный конденсатор:			
▪ солесодержание конденсата после конденсатного насоса	1,0 мг/л	1,5 мг/л	ЦТ7, дисплей	

Таблица 4. Перечень мест установки датчиков солемеров СПИ07-01 и СПИ07-02

Table 4. List of СПИ07-01 & СПИ07-02 salt gage locations

9	Водоопреснительные установки: ▪ солесодержание дистиллята после ВОУ	0–10 мг/л	5 мг/л	ЦПУ
10	Главный питательный трубопровод: ▪ солесодержание питательной воды после деаэратора	0,3 мг/л	0,5 мг/л	ЦПУ
11	Главный конденсатный трубопровод: ▪ солесодержание конденсата за главным конденсатором; ▪ солесодержание конденсата после ИФ – 1; ▪ солесодержание конденсата после ИФ – 2; ▪ солесодержание конденсата после ИФ – 3; ▪ солесодержание конденсата за конденсатором расхоложивания № 1; ▪ солесодержание конденсата за конденсатором расхоложивания № 2; ▪ солесодержание конденсата за конденсаторами расхоложивания № 1 и № 2 (режим промывки ПГ); ▪ солесодержание конденсата после конденсатора вспомогательного турбогенератора № 1; ▪ солесодержание конденсата после конденсатора вспомогательного турбогенератора № 2; ▪ солесодержание конденсата после конденсатора вспомогательного турбогенератора № 3	1 мг/л 0,5 мг/л 0,5 мг/л 0,5 мг/л 1,0 мг/л 1,0 мг/л 0–50 мг/л 1,0 мг/л 1,0 мг/л 1,0 мг/л	1,5 мг/л 0,8 мг/л 0,8 мг/л 0,8 мг/л 1,5 мг/л 1,5 мг/л – 1,5 мг/л 1,5 мг/л 1,5 мг/л	ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ ЦПУ

и коррозии. Однако, учитывая сложность их определения в судовых условиях, идентификацию этих показателей выполняют в базовых условиях при ревизии водного режима второго контура. Величина рН и концентрация определяющей ее углекислоты контролируются в воде первичного заполнения, а также в воде ПГ при длительном хранении. Контроль содержания кислорода (ВХЛ) в питательной воде является одним из основных условий обеспечения безотказной работы ПГ, а также деаэрирующих устройств в главном конденсаторе.

Несмотря на развитую комплексную систему контроля ВХР парогенерирующего контура, опыт эксплуатации ледоколов показал, что даже при высокой степени очистки воды непрерывная и длительная работа ПГ сопровождается повышением агрессивности воды. На испарительном участке ПГ происходит кипение воды и формирование отложений, каркас которых формируется из продуктов коррозии конструкционных материалов КПС и солей жесткости, имеющих пористую структуру. Скорость образования и время существования отложений зависит от конструктивных особенностей ПГ и режимов работы энергетической установки. При этом процесс формирования отложений проис-

ходит как при повышении содержания примесей в питательной воде, так и при несоответствии качества воды требованиям действующих норм.

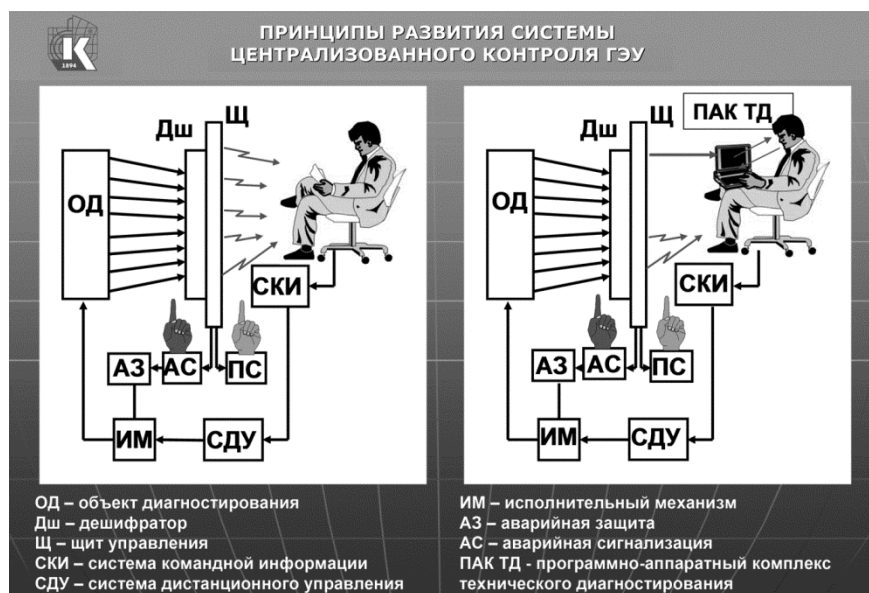
В случаях засоления (попадание солей в КПС с морской водой) накипеобразование интенсифицируется, т.к. морская вода более агрессивна в коррозионном отношении, чем монорастворы солей, составляющих ее основу. Результаты исследований, проведенных Крыловским центром на моделях прямооточного ПГ с дозировкой в питательную воду разбавленных растворов морской воды, показали, что уже при солесодержании воды 3–5 мг/л катионы жесткости образуют в парогенерирующем тракте соединения, трудно растворимые в воде (накипь).

При этом одним из основных соединений накипи на поверхности нагрева является гидроксид магния, образующаяся при гидролизе солей магния, что в свою очередь сопровождается образованием соляной и бромистоводородной кислот, весьма опасных в коррозионном отношении. Попадание солей с морской водой в КПС происходит в результате:

- нарушения герметичности теплообменного оборудования, связанного с забортной водой;
- заброса рассола опреснительных установок в дистиллят и попадания солей с добавочной водой;

Рис. 2. Совершенствование системы контроля водно-химического режима второго контура ядерной энергетической установки

Fig. 2. Improvement of water chemistry regime in the secondary circuit of nuclear powerplant



- потери герметичности соединений элементов оборудования КПС, находящихся под вакуумом;
- несоблюдения инструкций и нарушения правил ведения ВХР.

Засоления условно разделяют на два типа. Первый тип вызывает только повышение концентрации ионов тех компонентов, которые попадают в питательную воду при работе ионитных фильтров второго контура, когда емкость загрузки по двухвалентным металлам еще не выработана. В этом случае качественный состав питательной воды в экономайзерной зоне и химический состав образующихся в ПГ отложений аналогичны таковым при ведении ВХР без засолений. Однако, если качество питательной воды находится на уровне, соответствующем верхнему пределу нормы, опасность возникновения засоления увеличивается и срабатывает предупредительная сигнализация солемеров, установленных в КПС.

Засоления второго типа сопровождаются не только количественным ростом концентрации примесей, но и изменением их состава. В питательной воде появляются соли кальция и магния, гидролиз которых вызывает подкисление солевого раствора. Происходит это в результате попадания в КПС заборной воды и при выработке ресурса загрузки обессоливающего ионообменного фильтра или при его отключении.

Исследования трубных систем ПГ, потерявших герметичность после засоления второго кон-

тура, показывают различную скорость коррозии металла ПГ. В первом случае скорость язвенной коррозии не превышает 0,05–0,1 мм за 1000 ч работы, при втором типе засоления скорость коррозии достигает 0,5 мм за 100 ч работы, что подтверждает актуальность и необходимость совершенствования не только процедур и измерительной техники химического контроля водного режима для своевременного обнаружения отклонений показателей качества воды от заданных нормами значений, но и автоматизацию задач поиска причин засоления КПС, которая решается оператором, последовательно включенным в автоматизированную цепочку измерения солесодержания (рис. 2а).

Определение места разгерметизации теплообменного контура требует, с одной стороны, высокой квалификации оператора, с другой – «человеческий фактор» никто не отменял, и практика фиксирует случаи завышения уставок солемеров, а также отсутствия реакции на предупредительную сигнализацию солемеров или их отключения. Более того, отсутствие оперативного контроля солесодержания воды в КПС в диапазонах от 2 до 300 мг/л и от 2 до 300 мг/л в ВОУ, а также отсутствие независимой автоматической регистрации солесодержания в этих диапазонах создаст неконтролируемую динамику солесодержания и коррозионных процессов в трубной системе ПГ, приводящую к срабатыванию аварийной защиты КПС.

Заключение

Conclusion

Казалось бы, учитывая интегральную компоновку реакторной установки новых ледоколов (проект 22220 «Арктика») [5] и, следовательно, затрудненный доступ к трубным системам ПГ, автоматизация процедур контроля ВХР должна быть доведена до логического конца путем формализации задачи поиска причин засоления КПС с выдачей на дисплей информации в словесно-рекомендательной форме места разгерметизации контура и управляющего воздействия по его локализации.

Однако этого не произошло. Поддержание бескоррекционного нейтрального ВХР на новых ледоколах выполнено в соответствии с ОСТ В5.4318-80 «Вода второго контура и основного запаса судовых ядерных энергетических установок. Технические требования к качеству» и РД 5.4101-89 «Приборы контроля водоподготовки судовых энергетических установок. Типовые схемы и общие требования к включению датчиков в конденсатно-питательную систему» и не имеет принципиальных отличий ВХР второго контура ледоколов ранней постройки, анализ которых выполнен выше.

В то же время нельзя не учитывать факт совершенствования комплексных систем управления техническими средствами (КСУ ТС) ледоколов нового поколения, в составе которых система централизованного контроля (СЦК) дополнена программно-аппаратным комплексом технического диагностирования (ПАК ТД) оборудования ЭУ. ПАК ТД позволяет формализовать решение наиболее ответственных задач по поддержанию ВХР второго контура и вывести оператора в параллельную цепочку автоматизированного контроля ВХР КПС (рис. 2б). Программно-алгоритмический модуль в первом приближении должен включать формализацию наиболее ответственных задач ВХР, решаемых оператором:

- регистрация текущей информации солемеров, ее хранение и представление по вызову на дисплей (графопостроитель), что позволяет в реальном масштабе времени следить за динамикой изменения солесодержания в КПС;
- поиск причин засоления контура при срабатывании предупредительной и аварийной сигнализации с выдачей на дисплей ПАК ТД информации о причинах нарушения ВХР и рекомендации по их локализации в словесно-рекомендательной форме [2].

В рамках реализации сформулированных задач целесообразно расширение пределов измерения

солесодержания питательной воды в КПС путем установки дополнительных комплектов солемеров, например СПИ-11М, ПСК с датчиком ДСВ перед ионитными фильтрами и на трубопроводах после ВОУ с пределами измерений до 300 мг/л. Установка дополнительных солемеров позволяет в стандартных условиях эксплуатации ограничиться контролем за ВХР второго контура по солесодержанию рабочих сред, сократив ручной химический анализ (ВХЛ), который будет использоваться только для периодической проверки показаний солемеров, работающих в онлайн-режиме.

Список использованной литературы

1. Данилов А.Т. Пятидесятилетний опыт эксплуатации атомного ледокольного Флота России // Атомная стратегия XXI века. 2009. № 10. С. 20–22.
2. Мясников Ю.Н., Хорошев В.Г. Технология диагностического обеспечения плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) // Арктика; экономика и экология. 2017. № 3. С. 69–84.
3. ОСТ 5.4318-80. Вода второго контура и основного запаса судовых ядерных энергетических установок. Технические требования к качеству. [Б.м.], 1981. 17 с.
4. РД 5.4101-89. Приборы контроля водоподготовки судовых энергетических установок. Типовые схемы и общие требования к включению датчиков в конденсатно-питательную систему. [Б.м.], 1989. 18 с.
5. Ледоколы пр. 22220. Технические преимущества и перспективы судоходства // Военное обозрение : [сайт]. 2021. URL: topwar.ru/179865-ledokoly-pr-22220-tehnicheskie-preimuschestva-i-perspektivy-sudohodstva.html (дата обращения: 20.09.2023).

References

1. Danilov A.T. Fifty-year experience with nuclear icebreaker fleet of Russia // Nuclear strategy in the XXI century. 2009. No. 10. P. 20–22 (*in Russian*).
2. Myasnikov Yu.N., Khoroshev V.G. Technology of diagnostic support for floating nuclear co-generation plant (ПАТЭС) // Arctic; economics and ecology. 2017. No. 3. P. 69–84 (*in Russian*).
3. OST5.4318-80. Secondary Loop Water and the Main Supply of Ship NPPs. Technical quality requirements, 1981. 17 p. (*in Russian*).
4. RD 5.4101-89. Control instruments of water treatment for ship powerplants. Type flowcharts and general requirements for connection of sensors in condensate-feeding system. 1989. 18 p. (*in Russian*).
5. Icebreakers of project 22220. Technical advantages and prospects of shipping // Military Review : [site]. 2021. URL: topwar.ru/179865-ledokoly-pr-22220-tehnich

cheskie-preimuschestva-i-perspektivy-sudohodstva.html
(Accessed: 20.09.2023).

центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-58. E-mail: E_chebotarev@ksrg.ru.

Сведения об авторах

Добрин Борис Иоленович, к.т.н., начальник сектора 4-го отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Мясников Юрий Николаевич, д.т.н., главный научный сотрудник отдела перспективного развития предприятия и инновационных разработок ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.

Чеботарёв Евгений Николаевич, старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный

About the authors

Boris I. Dobrin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre.

Yuri N. Myasnikov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Department for Advanced Development and Innovative R&Ds, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.

Evgeny N. Chebotarev, Leading Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-58. E-mail: E_chebotarev@ksrg.ru.

Поступила / Received: 14.09.23

Принята в печать / Accepted: 29.11.23

© Добрин Б.И., Мясников Ю.Н., Чеботарёв Е.Н., 2023