УДК 621.182.12 + 628.165

Модульная мембранно-сорбционная установка получения обессоленной воды для теплоносителей ЯЭУ

В.А. Василенко, В.Н. Епимахов, И.В. Мирошниченко, О.Ю. Пыхтеев

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

В статье приведено описание разработанной и изготовленной в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» автоматизированной модульной мембранно-сорбционной установки получения воды высокой чистоты для первичного заполнения и подпитки водного теплоносителя первых контуров ядерных энергетических установок (ЯЭУ) транспортного назначения. В работе установки реализована усовершенствованная четырёхступенчатая технология водоподготовки, позволяющая использовать в качестве исходной как хозяйственно-питьевую воду, так и солоноватые воды Балтийского моря.

Приведены результаты ресурсных испытаний установки, изложены внедренные усовершенствования базовых технологий водоподготовки: подщелачивание, цитратные промывки, трилонные обработки мембран, термическая декарбонизация сорбентов. Отмечается, что результаты ресурсных испытаний подтверждают перспективность перехода от традиционных методов дистилляции и ионного обмена к мембранно-сорбционной технологии приготовления воды высокой чистоты, используемой в качестве теплоносителей не только ЯЭУ транспортного назначения, но и промышленных энергоблоков АЭС, что подтверждено результатами ресурсных испытаний опытного образца установки на ЛАЭС-2.

Ключевые слова: вода высокой чистоты, теплоноситель ЯЭУ, фильтрация, обратный осмос, термическая декарбонизация, мембранно-сорбционная водоподготовка.

UDC 621.182.12 + 628.165

Modular membrane-sorption plant for preparation of high-purity coolant water for nuclear power plants

V.A. Vasilenko, V.N. Epimahov, I.V. Miroshnichenko, O.Yu. Pyhteev

FSUE «Alexandrov NITI», Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper presents an automated modular membrane-sorption plant developed and manufactured in FSUE «Alexandrov NITI» for preparation of high-purity water used for filling and coolant makeup of the primary systems of naval reactor plants. The plant implements an improved four-stage water treatment technology which allows using both drinking water and saltish water of the Baltic Sea as source water.

The paper describes the results of plant testing and the improved features of water treatment technologies, such as alkalization, citrate washing, trilon treatment of membranes, and thermal decarbonization of sorbents. The results of life testing of both a mockup plant (NITI) and a prototype plant (LNPP) for high-purity water preparation are given. It is noted that the results of life testing confirm the perspectiveness of change-over from the traditional distillation and ion-exchange methods to membrane-sorption technology for preparation of high-purity coolant water used in naval reactor plants.

Key words: high-purity water, coolant, filtration, reverse osmosis, thermal decarbonization, membrane-sorption water treatment.

Введение

Целью работы являлось создание автоматизированной установки и отработка новой технологии получения воды высокой чистоты (ВВЧ) для исследовательского комплекса атомных реакторов ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» (НИТИ).

Вода высокой чистоты (с электропроводимостью не более 0.05 мкСм/см) играет важнейшую роль в обеспечении жизненного цикла транспортных ЯЭУ на всех его этапах: монтаж технологического оборудования, эксплуатация, ремонтно-модернизационные работы, вывод из эксплуатации. В транспортных ЯЭУ водо-водяного типа ВВЧ используется в качестве воды первичного заполнения и подпитки первых и вторых контуров, а также в качестве промывочной воды промконтуров (промежуточных контуров, дополняющих основной контур системы). Поддержание оптимальных водно-химических режимов технологических контуров ЯЭУ заключается, в первую очередь, в обеспечении соответствия показателей качества водного теплоносителя установленным техническим нормам [1].

Для практического использования в промышленных объёмах ВВЧ, в основном, получают методами дистилляции и ионного обмена. Однако, дистилляция требует высоких энергозатрат (до 60 кВт×ч/м^3) и экономически оправдана только при наличии большого количества дешевого пара, например, на АЭС. Заложенная в первоначальный проект комплекса ЯЭУ НИТИ установка дистилляционного получения ВВЧ обладала низкой эффективностью очистки, сложностью и громоздкостью оборудования, высокой стоимостью изготовления и высоким энергопотреблением при эксплуатации, требовала ионообменной доочистки с химической регенерацией фильтров.

Применение одной ионообменной очистки для получения ВВЧ экономически эффективно только для слабоминерализованных вод. Кроме того, при использовании такого метода также требуется частая регенерации фильтров с ионообменными смолами путём их промывок кислотами и щелочами, что приводит к образованию большого количества токсичных отходов.

Для исследовательских стендов-прототипов транспортных ЯЭУ в 1994 году в НИТИ был разработан прототип модульной мембранно-сорбционной установки (ММСУ) с целью подтверждения эффективности использования мембранных технологий для очистки и обессоливания воды [2, 3]. Установка до настоящего времени используется для очистки жидких радиоактивных отходов (ЖРО). С учётом положительного опыта длительной эксплуатации прототипа установки ММСУ по очистке ЖРО, которая используется по назначению до настоящего времени, в 2003 году была изготовлена автоматизированная мембранно-сорбционная установка получения из хозяйственно-питьевой воды (ХПВ) воды высокой чистоты (ММСУ-ВВЧ) для первоначального заполнения и подпитки контуров ЯЭУ НИТИ. Принципы отработанной на ММСУ-ВВЧ новой технологии приготовления ВВЧ из ХПВ легли в основу водоподготовительной установки, изготовленной для энергоблоков ЛАЭС-2, где в качестве исходного сырья используется вода Копорской губы Финского залива.

Экспериментальная часть

Водоснабжение ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» осуществляется из водозабора реки Систа. На водозаборе перед подачей в водопровод речная вода проходит коагуляционную очистку гидроксидом аммония и очистку фильтрацией через песчаные фильтры, что обеспечивает удаление коллоидов, взвесей и органических соединений. В случае неблагоприятной санитарной обстановки в воду производится дозирование активного хлора.

Физико-химический состав поступающей в НИТИ хозяйственно-питьевой воды (ХПВ) представлен в табл. 1. Как видно из табл. 1, основными макрокомпонентами воды ХПВ

являются катионы щелочноземельных и щелочных металлов – кальций, магний, натрий и калий, а анионный состав определяют сульфаты, хлориды, гидрокарбонаты и нитраты. Содержание кальция в 2.3 раза больше, чем магния и в 8.1 раз больше, чем натрия. Содержание сульфатов в 2.5 раза больше, чем гидрокарбонатов и в 4.4–6.6 раза больше, чем хлоридов. Из приведенных данных видно, что вода ХПВ, полученная из воды реки Систа, относится к среднеминерализованным кальциево-магниевым водам сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного класса.

Таблица 1

Физико-химический состав хозяйственно-питьевой воды, полученной из воды реки Систа

Контролируемый показатель	Значения показателя
Водородный показатель, pH	7.1–7.2
Сухой остаток, мг/л	272–290
Удельная электропроводимость, мкСм/см	340 – 430
Нефтепродукты, мг/л	0.05–0.06
Активный хлор, мг/л	≤ 0.5
Неорганический углерод, мг/л	27
Кальций, мг/л	35
Магний, мг/л	15
Натрий, мг/л	4.3
Калий, мг/л	2.3
Общее железо, мг/л	1.9
Железо, мг/л	0.06–0.07
Медь, мг/л	0.026–0.029
Алюминий, мг/л	≤0.1
Жесткость, мг-экв/л	4.2–4.6
Щелочность, мг-экв/л	3.1–3.2
Сульфаты, мг/л	68
Хлориды, мг/л	10.3–15.5
Нитраты, мг/л	9.7
Нитриты, мг/л	0.08
Фториды, мг/л	0.08

В случае временного приостановления подачи водопроводной воды, в качестве источника водоснабжения может использоваться и техническая вода НИТИ, забираемая из Копорской губы Финского залива, солесодержание (сухой остаток) которой от 6 до 14 раз превышает аналогичный показатель воды ХПВ, полученной из воды реки Систа. Показатели технической воды приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели технической воды, забираемой из Финского залива

Контролируемый показатель	Значения показателя
Водородный показатель, pH	7.4–8.5
Взвешенные вещества, мг/л	5.3–6.5
Сухой остаток, мг/л	1 735–4 022

На основании данных по физико-химическому составу вод реки Систа и Финского залива были проведены расчёты и разработана технологическая схема мембранно-сорбционной установки получения ВВЧ. Для получения ВВЧ из воды ХПВ требуется понизить содержание хлоридов в 300–4300 раз и по удельной электропроводимости в $5\cdot10^2$ –$5\cdot10^5$ раз.

Разработанная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, представляет собой комплекс оборудования, организованного в трёхступенчатую технологическую линию очистки вод с солесодержанием как пресных (до 0.5 г/л), так и солоноватых (до 4 г/л) вод.

Первая ступень очистки, включающая четыре насыпных угольных фильтра Ф1–Ф4 объёмом по 150 дм^3 каждый и микрофильтр Ф5 с патронными элементами глубинного типа проницаемостью до 10 мкм, обеспечивает доочистку воды ХПВ от взвешенных веществ и органических веществ, а также от активного хлора. На первой стадии производится удаление взвесей до ≤1 мг/л, нефтепродуктов до ≤ 0.01 мг/л и активного хлора до ≤ 0.01 мг/л, что требуется для нормальной работы обратноосмотических мембран.

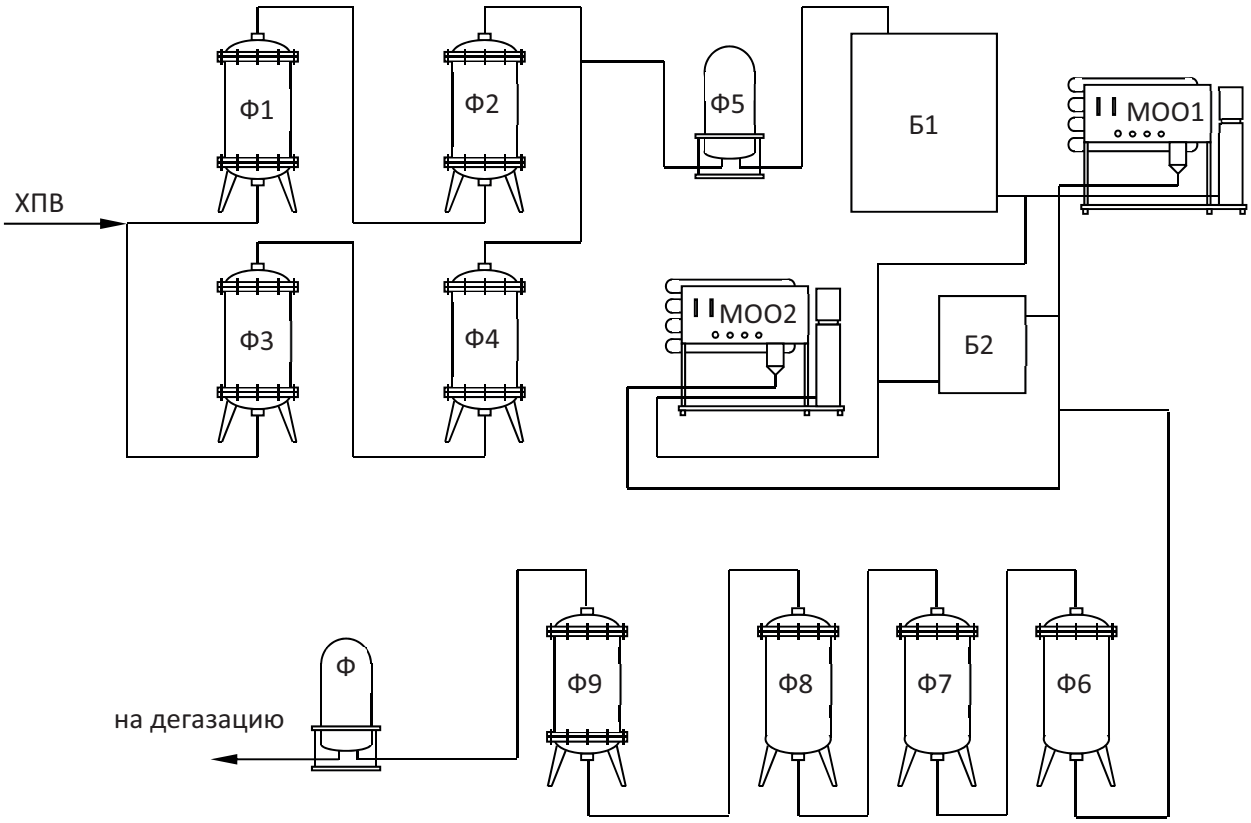

Рис. 1. Принципиальная схема ММСУ-ВВЧ:

Ф1-Ф4 и Ф9 – угольные фильтры; Ф5 и Ф10 – микрофильтры; Б1 – накопительный бак;
Б2 – промежуточный бак; МОО1 и МОО2 – модули обратного осмоса, Ф6-Ф8 – ионообменные фильтры.

Вторая ступень включает два обратноосмотических (ОО) модуля: МОО1 с восемью и МОО2 с шестью рулонными мембранными элементами типа ESPAI-4040 с селективностью по NaCl – 99.2 %. При фильтрации воды происходит разделение потока на концентрат, обогащенный солями, и пермеат, обедненный по солям.

Два ОО модуля обеспечивают снижение солесодержания и умягчение воды более эффективно, чем один модуль, тем самым, значительно уменьшая нагрузку на последующую ионообменную доочистку. В состав третьей ступени очистки входят три последовательно соединенных насыпных фильтра Ф6, Ф7, Ф8 объёмом по 0.12 м^3 (смесь катионообменной и анионообменной смол), обеспечивающих окончательное обессоливание воды. Кроме основных трёх ступеней очистки на финише установлены дополнительный фильтр Ф9 с активированным углем для улавливания продуктов деструкции ионитов, а также микрофильтр Ф10 для улавливания ча-

стиц размером более 10 мкм из насыпных ионообменных и угольных фильтров. Также в состав установки входят накопительный бак Б1 и промежуточный бак Б2. Установка укомплектована приборами измерения давления, расхода, электропроводимости исходной воды и фильтрата.

Алгоритм работы установки даёт возможность использовать её как с параллельным, так и с последовательным соединением обратноосмотических модулей. Работа установки с параллельным соединением модулей применяется для достижения максимальной производительности 4.2 м^3/ч по очищенной воде, например, при получении большого количества обессоленной воды для отмывки трубопроводов и контурного оборудования. Работа установки с последовательным соединением модулей с производительностью до 1.8 м^3/ч предназначена для получения более чистой воды, например, на стадии заполнения первого контура ЯЭУ и последующей подпитки. При дистилляционной технологии получения ВВЧ часто используются два выпарных аппарата.

В этих условиях солесодержание воды после МОО даже при параллельной их работе не превысит 20 мг/л, при последовательной работе модулей обратного осмоса – 10 мг/л, а финишной воды после ионообменных фильтров, соответственно, не более 1.0 и 0.3 мг/л. При исходной удельной электропроводимости воды ХПВ 340–430 мкСм/см в случае последовательной работы модулей обратного осмоса МОО1 и МОО2 обеспечивалось получение после фильтра смешанного действия (ФСД) финишной воды с электропроводимостью менее 0.1 мкСм/см.

Испытания ММСУ-ВВЧ проводили с января 2006 года по октябрь 2007, проверяя все режимы работы МОО. Удельная электропроводимость пермеата, получаемого на МОО, находилась в диапазоне от 5.8 до 9.8 мкСм/см (рис. 2). В целом, за этот период испытаний было получено 2 390 тонн ВВЧ, на что истрачено 1 260 л ионитов. Таким образом, 1 литр смолы обеспечивал в среднем получение 1.9 тонны ВВЧ.

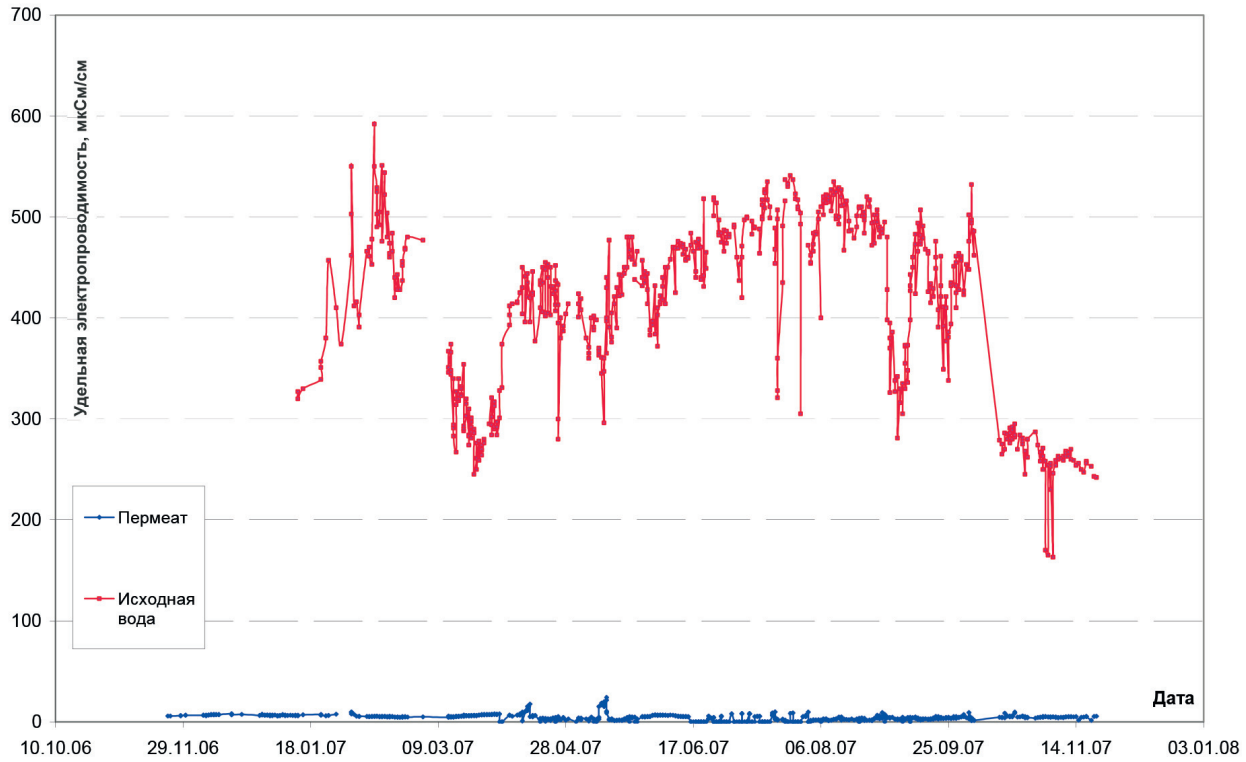

Рис. 2. Изменение удельной электропроводимости исходной воды ХПВ и пермеата модуля обратного осмоса МОО2 на установке ММСУ-ВВЧ за период с 23.11.2006 по 22.11.2007

Характеристика очистки воды ХПВ от солей на модулях ММСУ-ВВЧ приведена в табл. 3. Как следует из табл. 3, обратноосмотические модули обеспечивают, в первую очередь, очистку от катионов щелочноземельных металлов ($К_{МОО1}$ = 60–70, $К_{МОО2}$ = 6–10), а ионообменные фильтры – в большей степени от катионов щелочных металлов ($К_{ФСД}$ = 20–25).

Таблица 3

Характеристика очистки воды ХПВ от солей на модулях ММСУ-ВВЧ

Фильтр ММСУ-ВВЧ	К – коэффициент очистки от солей (по электропроводимости)	К– коэффициент очистки от ионов				
		Ca^{2+} – Mg^{2+}	Na^{+} – K^{+}	$^{*}CO_3^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl^{-}
МОО1	40–45	60–70	3.5–4	5–10	100–120	40–50
МОО2	20–25	6–10	1.8–2	1.0–1.2	60–70	10–12
ФСД	60–70	2–3	20–25	100–130	≤ 100	≤ 100

*Примечание: *Для суммы всех форм неорганического углерода в пересчёте на CO_3^{2-}*

Было установлено, что ресурс работы ФСД существенно ниже ожидаемой величины. Анализ причин показал, что обменная ёмкость использованной в ФСД анионообменной смолы практически полностью занята гидрокарбонат-ионами. Это связано с тем, что растворенный в исходной воде углекислый газ плохо задерживается на обратноосмотических элементах установки (всего на 70 %) и сорбируется на анионите в количестве 30 %. Более 95 % обменной ёмкости анионообменных смол заполнено гидрокарбонатами и карбонатами, так как они являются основными компонентами воды ХПВ. Таким образом, снижение объёма получаемой ВВЧ напрямую связано с повышением содержания диоксида углерода и гидрокарбонатов в воде.

В целом, использование обратноосмотических модулей снижает нагрузку на ионообменные фильтры при обессоливании в 400 ÷1100 раз. Это позволяет не проводить регенерацию ионообменной смолы на фильтрах и избежать на стадии водоподготовки образования химически токсичных отходов [4, 5]. Получение обратноосмотического концентрата с солесодержанием не более чем на 20 % выше солесодержания исходной воды допускает его безопасный возврат в открытые водоемы.

Для повышения эффективности работы обратноосмотических модулей используются способ подщелачивания исходной воды для перевода гидрокарбонатов в карбонаты, или способ термической гидрокарбонизации. Испытание разработанной ММСУ-ВВЧ с целью повышения эффективности её работы продолжили с реализации режима подщелачивания.

Режим подщелачивания

С целью снижения CO_2 в пермеате в период с апреля по август 2007 года проводили испытание работы установки в режиме подщелачивания исходной воды [6]. В результате происходило смещение pH в щелочную область с pH более 8.3, в которой свободный углекислый газ в растворенном виде практически не присутствовал, а неорганический углерод находился в форме карбонатов [7, 8]. За этот период было получено около 1 000 м^3 ВВЧ, при этом ресурс ионообменных фильтров был увеличен в 3 раза, а содержание карбонатов в пермеате не превышало 6.3 мг/л (табл. 4).

Одним из недостатков такой технологии получения ВВЧ с использованием исходной воды с повышенной жесткостью при pH более 8.3 является частое засорение мембранных элементов образующимися малорастворимыми карбонатами щелочноземельных элементов кальция и магния, а также гидроксидами железа.

Это приводит к снижению производительности работы модулей по пермеату и ухудшению его качества на 95–97 %. Образование отложений на мембранах приводит к засорению и уплотнению их капилярно-пористой структуры. При этом происходит изменение pH пермеата, а селективность ОО-элементов и самих обратноосмотических модулей приближается к паспортной.

Таблица 4

Изменение pH, удельной электропроводимости, содержание неорганического углерода при обратноосмотической очистке воды ХПВ в режиме подщелачивания

pH подщелаченной воды ХПВ → pH пермеата	Изменение удельной электропроводимости воды ХПВ → пермеат, мкСм/см	Селективность МОО по удельной электропроводимости, %	Изменение содержания неорганического углерода в пересчёте на карбонат воды ХПВ → пермеат, мг/л	Селективность МОО по карбонату, %
7.9 → 6.4	550 → 5.0	99.1	165 → 1.5	99.1
8.8 → 7.1	609 → 11.8	98.9	195 → 4.2	99.1
8.9 → 6.0	366 → 9.78	97.4	170 → 1.4	99.1
9.2 → 7.5	550 → 5.2	99.1	160 → 6.3	96.1
10.0 → 6.8	372 → 6.9	98.2	170 → 0.9	99.5

Режим промывки

Для удаления образующихся осадков карбонатов и гидроксидов с фильтрующей поверхности мембранных обратноосмотических элементов, восстановления производительности и качества пермеата проводили химические промывки с использованием промывочных растворов, рекомендованных фирмами-производителями: растворы лимонной, щавелевой, фосфорной кислот, гексаметафосфата натрия и натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты.

Выполнение химических промывок состояло в проведении следующих операций: приготовлении промывочных растворов, заполнении модуля раствором в течение 3–4 минут, выдержке в течение одного часа модуля с промывочным раствором, промывке модуля в течение одного часа, промывке модуля чистой водой (фильтратом) от остатков промывочного раствора в мембранных элементах и промывке модуля исходной водой из бака Б1 со сбросом пермеата в канализацию. Промывка завершалась, когда электропроводимость пермеата стабилизировалась и восстанавливалась производительность модулей.

Химическая промывка обеспечивала восстановление технических характеристик мембранных рулонных элементов и самих обратноосмотических модулей. Восстанавливалось качество пермеата по удельной электропроводимости на уровне 1–3 мкСм/см.

Последовательность проведения промывок и данные по изменению производительности модулей МОО1 и МОО2, удельной электропроводимости пермеата в процессе промывок приведены в табл. 5. Из данных табл. 5 следует, что лучшие результаты получены при использовании растворов лимонной и щавелевой кислот. Производительность при таких промывках увеличивается в 1.2–1.4 раза. При промывках Трилоном Б и гексаметафосфатом в лучших случаях производительность увеличивается в 1.1 раза. Цитратные и оксалатные промывки улучшают и качество пермеата.

При выборе промывочных растворов для мембранных элементов было достигнуто уменьшение удельной электропроводимости в 1.7–2.4 раза. Для промывки выбран наиболее безопасный для окружающей среды раствор лимонной кислоты.

Информация об улучшении производительности работы установки представлена в табл. 5.

Влияние цитратных промывок на улучшение качества пермеата наглядно демонстрирует рис. 3. Из представленной зависимости видно, что, с использованием цитратных промывок удельная электропроводимость пермеата снижается в 2.2–3.5 раза.

Таблица 5

Сводные данные по производительности и электропроводимости пермеата при использовании цитратных, оксалатных и гексаметафосфатных промывочных растворов

Модуль	Состав промывочного раствора	Показатели			
		Производительность модуля, м³/ч		Удельная электропроводимость пермеата, мкСм/см	
		до промывки	после промывки	до промывки	после промывки
МОО1	Раствор лимонной кислоты 20 г/л, pH = 4–5	1.4	1.9	43.5	18.1
	Раствор щавелевой кислоты 9.3 г/л, pH = 3–4	1.4	1.9	16.5	7.3
	Раствор трилона Б 6.7 г/л и натрия гексаметафосфата 13.3 г/л, pH = 9–10	1.9	1.9	9.7	8.4
	Раствор ортофосфорной кислоты			8.3	6.2
МОО2	Раствор лимонной кислоты 20 г/л, pH = 4–5	1.3	1.6	8.0	4.6
	Раствор щавелевой кислоты 9.3 г/л и натрия гексаметафосфата 1.7 г/л, pH = 7–8	1.3	1.7	16.0	7.3
	Раствор трилона Б 6.7 г/л и натрия гексаметафосфата 13.3 г/л, pH = 9–10	1.5	1.7	4.2	3.5

Эффективность химических промывок рулонных обратноосмотических элементов, проведённых в течение полугода, доказывают приведенные в табл. 6 данные атомно-абсорбционного анализа. С поверхности мембран за одну операцию вымываются значительные количества кальция, железа, магния и алюминия.

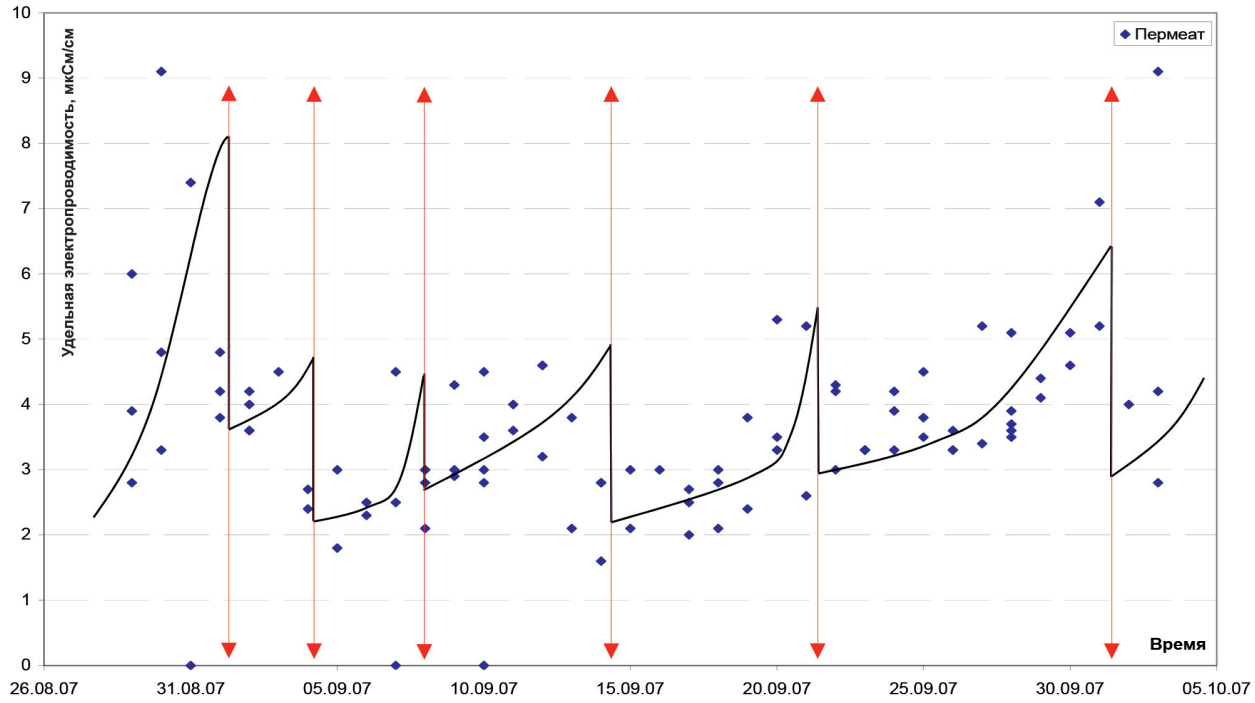

Рис. 3. Влияние цитратных промывок на восстановление удельной электропроводимости пермеата обратноосмотических модулей. Стрелками указано время начала проведения промывок

Таблица 6

Результаты элементного атомно-абсорбционного анализа промывочных вод

Модуль	Состав промывочного раствора	Концентрация элемента, мг/л			
		Fe	Ca	Mg	Al
МОО1	раствор лимонной кислоты 20 г/л, pH = 4–5	45.5–64	713–810	32.5–42	9.8–13.5
	раствор трилона Б 6.7 г/л и натрия гексаметафосфата 13.3 г/л, pH = 9–10	19	670	20.6	5.9
МОО2	раствор лимонной кислоты 20 г/л, pH = 4–5	25.8	850	27.1	6
	раствор трилона Б 6.7 г/л и натрия гексаметафосфата 13.3 г/л, pH = 9–10	6.2	630	14.4	3.8

Режим термической декарбонизации

В целях дальнейшего снижения содержания свободной углекислоты в исходной воде и увеличения ресурса ионообменной смолы в марте 2007 года было принято решение на проведение декарбонизации термическим способом, так как щелочной режим не устраивал эксплуатационный персонал использованием агрессивных химических реагентов и проведением частых реагентных промывок [6]. Предварительные эксперименты по декарбонизации продувкой воздухом при комнатной температуре не дали существенных изменений и были весьма длительны по времени [9]. Наиболее быстрый и простой способ реализации технологии термической декарбонизации – это использование воды из системы горячего водоснабжения (ГВС) института [10]. В табл. 7 представлены результаты атомно-абсорбционного анализа проб воды ХПВ и ГВС.

Таблица 7

Результаты атомно-абсорбционного анализа проб воды ХПВ и ГВС

Пробы	Содержание элементов, мг/л						
	Кальций	Магний	Железо	Натрий	Калий	Алюминий	Марганец
Вода ХПВ	35.3	15.0	1.92	4.3	2.28	0.4	0.07
Вода ГВС	9.0	3.7	0.03	7.9	1.87	0.1	0.16

Как показали предварительные исследования, вода ГВС не содержит углекислого газа. При использовании ГВС резко снижается необходимое количество реагентных промывок МОО, так как вода ГВС проходит предварительное умягчение катионитами в натриевой форме и поэтому в ней только содержание натрия выше, чем в воде ХПВ. Содержание кальция в воде ГВС меньше в 3.9 раза, содержание магния – в 4.1 раза, содержание калия в – 1.2 раза, железа – в 64 раза, алюминия – в 4 раза, (табл. 7). Кроме того, после охлаждения воды ГВС до 30–40 °С производительность установки по пермеату увеличивается в два раза. Использование воды ГВС в качестве исходной началось с октября 2007 года. В результате ресурс ионообменных смол увеличился ещё в 2 раза, так как в воде ГВС солесодержание в 2 раза ниже, чем в воде ХПВ. По результатам испытаний ММСУ-ВВЧ режим термической декарбонизации с использованием воды ГВС был признан оптимальным и выбран в качестве основного [10].

Таким образом, общая схема получения воды высокой чистоты включает следующие стадии очистки:

– приготовление воды ХПВ из речной воды путем коагуляционной очистки и фильтрацией через насыпные песчаные фильтры и хлорирование;

– приготовление воды ГВС, включающей умягчение на Na-катионите и термическую декарбонизацию;
– получение из воды ГВС воды высокой чистоты, путем сорбционной очистки на угольном фильтре от активного хлора, микрофильтрации, двойной гиперфильтрации с заключительной ионообменной доочисткой.

Схема получения воды высокой чистоты, реализованная с использованием воды ХПВ и ГВС, включает четыре стадии – термической декарбонизации, микрофильтрации, двойной гиперфильтрации и ионообменной доочистки. Данная мембранно-сорбционная схема отличается от дистилляционно-ионообменной схемы заменой стадии выпаривания всей исходной воды, на стадию её нагрева и фильтрации через осмотические фильтры. Отсутствие межфазового перехода вода-пар даёт десятикратный выигрыш в энергозатратах. Кроме того, по сравнению с выпарным аппаратом, микрофильтрационный и обратноосмотический модули, входящие в состав ММСУ-ВВЧ, отличается простотой и компактностью.

Многолетний успешный опыт разработки и внедрения обратноосмотической технологии получил свое дальнейшее развитие в атомной промышленности. Например, на новых блоках Ленинградской АЭС также внедрена мембранная технология получения ВВЧ. Водоподготовительная установка использует воду Финского залива в качестве исходной воды. Осветленная и частично очищенная от органических примесей с помощью ультрафильтрации вода подается на установку обратного осмоса первой ступени, где обеспечивается её обессоливание до 100 мг/дм^3. Далее вода подается на мембранный декарбонизатор для удаления излишней углекислоты. Обработанная таким образом вода подается с расходом 137.5 м^3/ч в брызгальные бассейны и баки противопожарного запаса, а далее для дальнейшей обработки на установку обратного осмоса второй ступени. В качестве финишной очистки применяется глубокое ионообменное обессоливание на фильтрах смешанного действия. Финишная вода удовлетворяет требованиям для подпитки первого и второго контуров АЭС. Производительность установки получения ВВЧ составляет 90 м^3/ч. Предлагаемая схема позволяет минимизировать количество сточных вод, она экономична и экологична [10].

Заключение

Разработана, изготовлена и испытана модульная мембранно-сорбционная установка получения воды высокой чистоты ММСУ-ВВЧ с системами химического и теплотехнического контроля качества получаемой воды.

Установка обеспечивает очистку исходной хозяйственно-питьевой воды, а также солоноватой и морской воды с солесодержанием менее 10 г/л до нормативных показателей воды высокой чистоты, пригодной для использования в качестве теплоносителя ЯЭУ и получение концентрата с параметрами, допускающими его слив в открытые водоёмы.

Суммарный коэффициент очистки пермеата по солям достигает величины 10^5. Потребляемая мощность установки составляет 12 кВт при рабочем давлении в обратноосмотическом модуле 1.8 МПа. Производительность установки – до 4 м^3/ч.

С учётом накопленного многолетнего опыта эксплуатации ММСУ-ВВЧ в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» мембранная технология приготовления воды высокой чистоты получила дальнейшее развитие на новых блоках Ленинградской АЭС, где также используется обратноосмотическая установка получения воды высокой чистоты производительностью 90 м^3/ч. В качестве исходной воды водоподготовительная установка ЛАЭС использует воду Финского залива, а финишная вода удовлетворяет требованиям качества воды подпитки первого и второго контуров реактора ВВЭР-1200.

Литература

1. *Хорошев В.Г.* Водно-химические режимы судовых ядерных энергетических установок: монография. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – 182 с.
2. From Rapid of Radiochemical Analysis to Modern Radiochemical Technologies For Decontami-nation of Gas-Aerosol Releases and Liquid Radwaste / V.N. Epimakhov, G.G. Leontjev, S.N. Nekrestjanov, V.V. Chetverikov // Demonstrating the Practical Achievements of Nuclear Waste Management and Disposal: Poster paper for Topseal'96, 9–12 June 1996, Stockholm.
3. *Epimakhov V.N.* Technology for treatment of low-activity liquid radwastes from nuclear power installation, using ultrafiltration, reverse osmosis, ion exchange and cementation / V.N. Epimakhov, M.S. Oleynik // Radioactive Waste Management: Commitment to The Future Environment V. II, October 10–14, Antwerp, Belgium, 1999. – P. 271–275.
4. Патент РФ № 2276110. Способ получения обессоленной воды и воды высокой чистоты для ядерных энергетических установок научных центров / В.Н. Епимахов, С.В. Глушков, М.С. Олейник, Т.В. Епимахов // Б.И. – 2006. – № 13.
5. Патент РФ № 2 442 756. Способ получения обессоленной воды и воды высокой чистоты для ядерных энергетических установок научных центров / В.Н. Епимахов, М.С. Олейник, Т.В. Епимахов, С.В. Прохоркин, А.Ф. Ганюшкин // Б.И. – 2012. – № 5.
6. Патент РФ № 2448057. Способ получения обессоленной воды и воды высокой чистоты для ядерных энергетических установок научных центров / В.Н. Епимахов, Т.В. Епимахов, М.С. Олейник, А.Ф. Ганюшкин, Н.А. Кораблёв // Б.И. – 2012. – № 11.
7. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. – М.: Химия, 1973. – 376 с.
8. *Кульский Л.А.* Технология водоочистки на атомных энергетических установках / Л.А. Кульский, Э.Б. Страхов, А.М. Волошина. – Киев: Наукова думка, 1986. – 272 с.
9. Патент РФ № 2383498. Способ получения обессоленной воды и воды высокой чистоты для ядерных энергетических установок научных центров / В.Н. Епимахов, М.С. Олейник, Т.В. Епимахов, А.Ф. Ганюшкин, Н.А. Кораблёв, А.И. Горшков, В.С. Гурский // – 2010. – № 7.
10. Патент РФ № 2468456, G21C9/307. Способ получения обессоленной воды и воды высокой чистоты для ядерных энергетических установок научных центров / В.А. Василенко, В.Н. Епимахов, О.Ю. Пыхтеев, И.В. Мирошниченко, М.С. Олейник, Т.В. Епимахов // Бюл. – 2012. – № 33.