

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hochreiter L., Cheung F. RBHT Reflood Heat Transfer Experiments Data and Analysis. The Pennsylvania State University. NUREG/CR-6980, 2012.
2. Сергеев В.В. Теплообмен в закризисной зоне парогенерирующих каналов и теплогидравлика ТВС в переходных и аварийных режимах. Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Обнинск, ФЭИ, 2007.
3. Hozer Z., Maroti L., Nagy I. e.a. CODEX-2 Experiment: Integral VVER-440 Core Degradation Test. KFKI-2000-02/G, 2000.
4. Базюк С.С., Попов Е.Б., Паршин Н.Я., Кузмяк Ю.А. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР. — Тепловые процессы в технике, 2010, № 12, с. 546—555.
5. Базюк С.С., Попов Е.Б., Паршин Н.Я. и др. Исследование повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР при максимальной проектной и запроектной авариях на стенде ПАРАМЕТР и разработка методики расчета характеристик смачивания. — Там же, 2012, № 4, с. 136—144.
6. Kiselev A., Nalivaev V., Parshin N.E. e.a. Modeling of thermal hydraulics aspects of top water reflood experiment PARAMETER-SF3 using SOCRAT/V2 code. — In: 20th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), 2009, v. 1, p. 182.

Поступила 30.01.13

В окончательной редакции 10.04.14

УДК 621.311.22

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК АЭС

Юрчевский Е.Б., Пичугина М.А. (ООО «АКВАХИМ», г. Москва),
Первов А.Г. (ВПО «Московский гос. строительный ун-т», г. Москва)

Водно-химический режим, снижая коррозионное повреждение конструкционных материалов второго контура, предотвращая отложения на теплообменных поверхностях и обеспечивая минимальный объем жидких сбросов, в значительной мере определяет надежность и безопасность эксплуатации АЭС [1]. Ужесточение норм, регламентирующих водно-химический режим, является общемировой тенденцией. В частности, современные нормы качества теплоносителя АЭС наряду с такими традиционными показателями, как удельная электропроводность, концентрация кислорода, железа и др., содержат новый показатель «общий органический углерод». Например, для Нововоронежской АЭС-2 этот показатель ограничен 0,5 мг/дм³ для водного теплоносителя обоих контуров и 0,1 мг/дм³ для добавочной воды. Такое жесткое нормирование, принятое на зарубежных электростанциях 10 лет назад, объясняется вредным воздействием некоторых органических веществ, поступающих в теплоноситель, главным образом, с добавочной водой.

Органические вещества, разлагаясь в зоне высокой температуры, могут продуцировать слабые, карбоновые и сильные кислоты, понижающие pH значительно меньше допустимых пределов. Характер взаимодействия органических соединений и продуктов их термолитиза с

корректирующими водный режим реагентами и конструкционными материалами изучен пока недостаточно. Поэтому нормирование общего органического углерода энергоблоков с ВВЭР-1000 объяснимо. Еще более жесткое нормирование общего органического углерода принято для энергоблоков АЭС с быстрыми реакторами. Для этих энергоблоков предельная концентрация общего органического углерода в питательной воде парогенератора не должна превышать 0,2 мг/дм³.

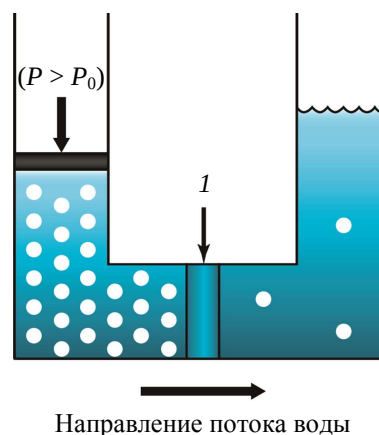
Важная роль в обеспечении норм водно-химического режима принадлежит водоподготовительной установке, предназначенной для первичного заполнения водой циркуляционных контуров АЭС и восполнения потерь пара и турбинного конденсата. Традиционная технология подготовки добавочной воды с использованием реагентных осветлителей, механических и ионообменных фильтров обеспечивает выполнение ранее действующих нормативных требований к ее качеству. Описанная технология позволяет снизить остаточное содержание всех ионизированных примесей в добавочной воде до 0,01 мг/дм³, электропроводность приближается к теоретическому пределу для химически чистой воды 0,056 мкСм/см. Однако некоторое количество неионизированных примесей, состоящих из соединений железа, кремния, алюминия

в комплексе с органическими веществами, может попадать в питательную воду. Поэтому введение нового показателя, ограничивающего содержание общего органического углерода, наряду с ужесточением экологических требований, ухудшением качества воды из природных водоисточников требует разработки и внедрения новых технологий подготовки воды.

В последнее время на тепловых и атомных электростанциях для подготовки обессоленной воды применяются и закладываются в проекты мембранные технологии очистки воды от взвешенных, коллоидных и растворенных примесей. Применение мембранных технологий позволяет удалять из обрабатываемой воды содержащиеся в ней загрязнения при минимальном использовании химических реагентов и гарантированно задерживать органические соединения.

Суть мембранной технологии состоит в продавливании природной воды под давлением P , превышающим осмотическое давление воды P_0 , как это показано на рис. 1, через полупроницаемые пористые мембраны, размер пор которых сопоставим с размером загрязнителей воды. При этом очищенная часть воды проходит через мембраны, оставшаяся вода с растворенными в ней солями, коллоидами и другими загрязнениями остается перед мембраной. Вода очищается без фазовых превращений, энергия расходуется только на продавливание воды через мембрану. Для подготовки воды в энергетике применяются следующие мембранные процессы: ультрафильтрация с использованием мембран с размером пор 0,02–0,15 мкм, нанофильтрация с размером пор 0,001–0,01 мкм, обратный осмос с размером мембранных пор до 0,001 мкм.

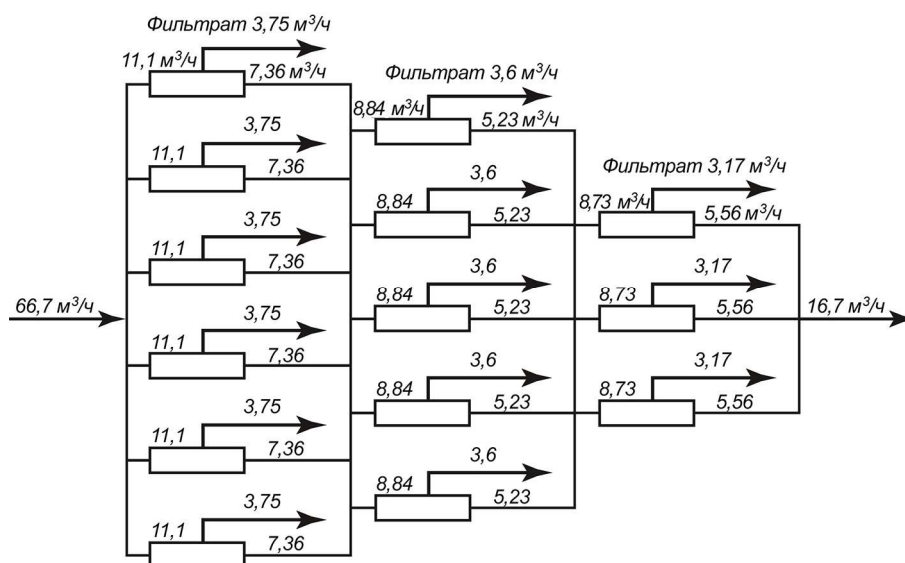
Практическое использование мембранных технологий в нашей стране началось с обратноосмотических обессоливающих установок, эксплуатируемых на тепловых электростанциях. Первые установки рассчитывали на основе характеристик мембран, разрешенной скорости и перепада давления, соотношения



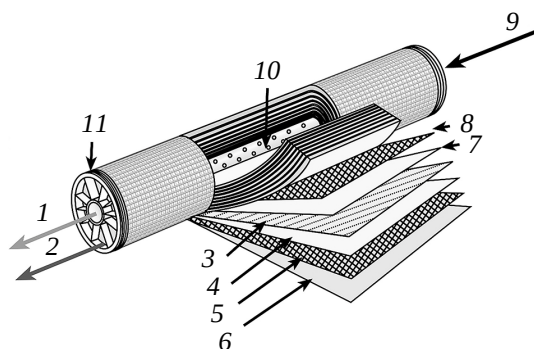
Р и с. 1. Принципиальная схема обратноосмотического обессоливания: 1 — полупроницаемая мембрана

между объемом исходной воды и получаемого фильтрата, предоставляемых производителями мембран. Эти методики позволяли рассчитать гидравлическую схему установки, пример которой показан на рис. 2. В настоящее время для расчета используются компьютерные программы фирм-производителей обратноосмотических элементов. Например, для расчета обратноосмотических установок с использованием мембран фирмы Film Tec (США) применяется компьютерная программа ROSA фирмы Hydranautics (США) — IMS Design.

Основой установок являются мембранные модули — напорные корпуса, в которых размещены свернутые в рулон мембраны, дренажные материалы, турбулизирующие сетки, герметизирующие элементы, направляющие для ввода и вывода разделяемых фильтрата и концентрата.



Р и с. 2. Принципиальная гидравлическая схема блока фильтрующих модулей установок производительностью 50 м³/ч



Р и с. 3. Рулонный мембранный обратноосмотический элемент: 1 — фильтрат; 2 — концентрат; 3 — фильтратоотводящий материал; 4, 7 — мембрана; 5, 8 — сепарирующая сетка; 6 — внешняя оболочка (пленка); 9 — исходная вода; 10 — перфорированная центральная трубка; 11 — вставка для предотвращения телескопирования с кольцевым уплотнением

Модули представлены на рынке готовыми неразборными изделиями, и при выработке ресурса мембраны подлежат замене целиком.

В энергетике нашли применение показанные на рис. 3 рулонные обратноосмотические элементы, имеющие большую удельную поверхность фильтрации в единице объема и легко отмываемые. Для высокопроизводительных обратноосмотических установок используется рулонный элемент типоразмера 8040 длиной 1016 мм, диаметром 203,2 мм. В одном рулоне размещается 35—39 м² фильтрующей мембраны. Современная композитная обратноосмотическая мембрана состоит из активного поверхностного слоя толщиной около 0,2 мкм, пористой полисульфоновой подложки толщиной 40 мкм и несущей основы из пористого полиэфира толщиной 120 мкм. Производительность по фильтрату одного элемента составляет 1,5—1,7 м³/ч. Максимальная температура обрабатываемой воды не должна превышать 45 °С, допустимый интервал рН 2—12. Для пресной воды рабочее давление 0,6—0,8 МПа.

Рулонные элементы изготавливаются из плоских мембран, наматываемых на центральную фильтратоотводящую трубку 10. Перед намоткой листы мембран 4 и 7 склеиваются в пакеты, между которыми прокладывается фильтратоотводящая сетка 3. Сепарирующая сетка 8 используется для подачи обрабатываемой воды между мембранами. После намотки рулонный элемент оборачивают специальной пленкой или наносят стеклопластиковое покрытие 6 для механической прочности. Рулонные элементы в

количестве одного—семи помещают в напорный корпус. Уплотнение 11 необходимо для предотвращения телескопирования и перетока обрабатываемой воды. Фильтратоотводящие трубки нескольких элементов соединяются муфтами с помощью уплотнений в единый канал. Обрабатываемая вода 9 вводится в элемент со стороны одного из торцов в аксиальном направлении. Фильтрат движется по спирали к центральной трубке 10, концентрат 2 выводится с противоположного торца. Концентрат обратноосмотических элементов, включенных ранее по ходу обрабатываемой воды, служит исходной водой последующих.

Доминирующую роль на отечественном рынке обратноосмотических элементов играет импортная продукция. Лидирующими производителями обратноосмотических элементов являются фирма FilmTec (США), вошедшая в 1985 г. в состав корпорации Dow Chemical (США), и фирма Hydranautics (США), объединившаяся в 1987 г. с корпорацией Nitto Denko (Япония). Эти два производителя занимают около 70% мирового рынка. Еще одним лидером является фирма Osmonics (США), в 2003 г. вошедшая в состав концерна General Electric (США) и получившая название GE Osmonics. В нашей стране ЗАО НТЦ «Владипор» производит обратноосмотические элементы типа ЭРО-КНИ 200-1016 на основе низконапорных обратноосмотических мембран фирмы Hydranautics, импортных турбулизаторов и дренажных материалов. По техническим характеристикам (производительность, селективность, ресурс) эти элементы соответствуют мировому уровню. В 2013 г. во Владимире введено в промышленную эксплуатацию новое производство по выпуску ультрафильтрационных, нанофильтрационных и обратноосмотических мембран и рулонных модулей на их основе. Планируется, что к 2017 г., когда предприятие выйдет на проектную мощность, объем выпуска составит не менее 2 млн м² мембранного полотна и 200 тыс. фильтрующих модулей в год, что позволит компании занять почти половину отечественного рынка.

Устройство обратноосмотических элементов предусматривает непрерывное удаление задержанных веществ от поверхности мембраны, поэтому при правильно организованном процессе обессоливание ведется непрерывно, в течение сотен и тысяч часов. Сборки обратноосмотичес-

ких модулей размещаются на специальных рамах, закрепляются и объединяются трубопроводами в соответствии с технологическим расчетом.

Помимо блока обратноосмотических модулей, в состав установок входят блоки питательных насосов, фильтров тонкой очистки для защиты обратноосмотических элементов от частиц взвеси размером более 5 мкм, дозирования антискалянта или кислоты для предотвращения отложений на поверхности мембран и химической промывки от минеральных и органических загрязнений.

Характерной особенностью обратноосмотических установок является постепенное уменьшение производительности по мере возрастания объема обработанной воды, а скорость снижения производительности является характеристикой качества предварительной подготовки исходной воды перед ее подачей на обратноосмотические мембраны. При снижении производительности установки на 10—15% проводится химическая промывка мембран кислотными и щелочными реагентами. При качественной химической промывке производительность установки возвращается к номинальной. Длительная работа установок с минимальной потерей номинальной производительности и стабильным качеством фильтрата является главной задачей при их эксплуатации. Основной причиной снижения производительности является осаждение на фильтрующей поверхности малорастворимых в воде соединений вследствие их концентрирования.

Значительное место среди мембранных технологий может занять нанофильтрация. Для нанофильтрации применяются мембраны, имеющие размер пор 0,001—0,01 мкм и несущие постоянный электрический заряд, который отталкивает от их поверхности одноименно заряженные ионы. Эффект отталкивания возрастает с увеличением заряда иона. Поэтому для нанофильтрации характерна большая эффективность удаления ионов кальция и магния при более низком давлении, чем у обратного осмоса. Эффективность удаления по двух-, трехвалентным ионам нанофильтрационных мембран обычно не превышает 90—95%, по одновалентным ионам — не более 50%. Поэтому при равной производительности нанофильтрационные мем-

браны менее склонны к осадкообразованию. Эта особенность нанофильтрации используется в мембранных водоподготовительных установках, рассчитанных на упрощенную предварительную подготовку воды или для работы без предочистки [2]. Конструкция нанофильтрационных фильтрующих элементов аналогична конструкции обратноосмотических элементов. Соответственно нанофильтрационные и обратноосмотические установки близки по комплектации и конструкции. На ТЭС и АЭС нанофильтрация может использоваться как первая ступень мембранного обессоливания или для умягчения и частичного обессоливания воды.

В тепловой энергетике в настоящее время уже работают десятки обратноосмотических установок для обессоливания добавочной воды [3]. Опыт их эксплуатации показывает, что применение обратноосмотической технологии обессоливания обеспечивает снижение содержания обрабатываемой воды на 97—98,8%, удаление солей жесткости на 98,8—99,2%, задержание 98—98,5% ионов натрия и 98,6—99% хлоридов. Электропроводность обработанной воды снижается до 5—50 мкСм/см. Сопоставление показывает, что фильтрат обратноосмотической установки по остаточному содержанию и электропроводности существенно превосходит фильтрат после первой ступени ионообменных фильтров, но уступает фильтрату второй ступени традиционных противоточных фильтров. При использовании двухступенчатого обессоливания содержание фильтрата снижается до менее чем 1 мг/дм³, электропроводность до менее 1 мкСм/см. Фильтрат обратноосмотических установок почти не содержит органических соединений.

Объем сточных вод при обратноосмотическом обессоливании обычно составляет 25—35% номинальной производительности установки, что превышает объем стоков при ионообменном обессоливании. Однако важно отметить, что количество сбрасываемых солей почти соответствует количеству поступающих с исходной водой и содержание исходного водоисточника не повышается. При ионообменном обессоливании количество сбрасываемых солей в 2—4 раза больше, чем поступает с исходной водой, что ведет к загрязнению солями гидросферы.

При эксплуатации обратноосмотических установок основные проблемы связаны с необходимостью предотвращения отложений взвеси, коллоидов и малорастворимых минеральных солей на поверхности мембраны. Первые отечественные обратноосмотические обессоливающие установки (ТЭЦ-25 Мосэнерго, Нижнекамская ТЭЦ-1, Воронежская ТЭЦ-1 и др.) были встроены в типовые технологические схемы водоподготовительных установок. Это обеспечивало приемлемое остаточное содержание железа (менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$), марганца (менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$), взвеси на уровне 1 мг/дм^3 , концентрация органических соединений уменьшалась на 50—70%, примерно на 50% удалялась кремниевая кислота (коллоиды). При этом содержание примесей в обработанной воде значительно зависело от сезонных колебаний качества исходной воды. Интегральный показатель качества предварительно очищенной воды SDI (Silt Density Index) приближался к верхнему пределу 5, установленному производителями мембран к качеству подаваемой на обессоливание воды. В результате быстро снижались производительность мембран, эффективность очистки, сокращался межпромывочный период работы установки, возрастали расходы химических реагентов на отмывку мембран от загрязнений.

Лучшие результаты в предварительной подготовке воды обеспечиваются при использовании другого мембранного процесса — ультрафильтрации. Ультрафильтрационные мембраны почти полностью задерживают содержащиеся в обрабатываемой воде тонкодисперсные и коллоидные примеси (остаточная концентрация менее $0,2 \text{ мг/дм}^3$), железо и марганец (остаточная концентрация менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$) и крупные органические макромолекулы. Интегральный показатель SDI стабилизируется на уровне 1—2 единиц. Применение для предварительной очистки ультрафильтрационной технологии на 20—40% увеличивает производительность обратноосмотической установки, в 3—4 раза возрастает межпромывочный период. Качество фильтрата характеризуется стабильностью и почти не зависит от изменений качества исходной воды. Эксплуатация ультрафильтрационных установок состоит из чередования операций — фильтрова-

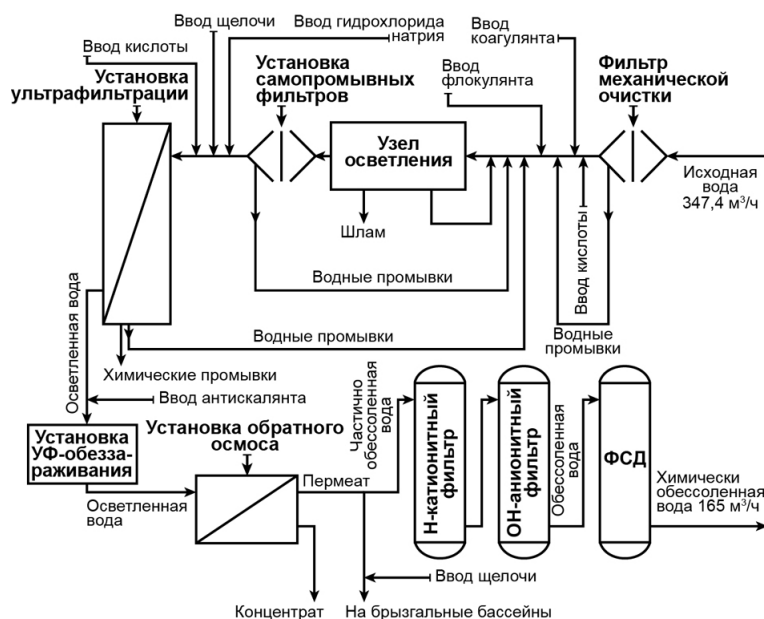
ние, водная промывка с периодичностью 3—6 в час, химическая промывка обеззараживающими, кислотными и щелочными реагентами с периодичностью, зависящей от качества обрабатываемой воды.

Для обратноосмотических установок характерна высокая степень поставочной готовности. Объем работ на монтажных площадках не превышает 5—8% стоимости поставленного оборудования. При использовании ионообменных фильтров на монтажных площадках наносятся антикоррозионные покрытия, собираются внутрикорпусные элементы конструкции и фронтальные трубопроводы, загружаются ионообменные фильтрующие материалы. Объем монтажных работ при этом не менее 50% стоимости фильтровального оборудования. Обратноосмотические установки компактны, размещаются и обслуживаются на меньших производственных площадях по сравнению с ионообменными установками. Например, для обессоливающей установки производительностью $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ при использовании ионообменных фильтров требуется примерно 100 м^2 площади с высотой не менее 5 м, для обратноосмотической установки равной производительности — не более 25 м^2 площади высотой 2,5—3 м.

Обратноосмотическая технология обессоливания уступает ионообменной в эффективности удаления растворенных примесей воды, что всегда требует на заключительных этапах очистки дополнять ее ионообменной обработкой. При обратноосмотическом обессоливании образуется больший объем сточных вод, чем при ионообменном обессоливании (25—35% объема исходной воды против 10—15%). Обратноосмотическая технология требует более качественную предварительную подготовку.

В качестве примера использования мембранной техники (ультрафильтрационного осветления воды и обратноосмотического обессоливания) может быть рассмотрена принципиальная технологическая схема водоподготовительной установки для обессоливания природной воды по проекту Нововоронежской АЭС-2, приведенная на рис. 4.

Водоподготовительная установка спроектирована по блочно-модульному типу в шесть ста-



Р и с. 4. Принципиальная схема установки химводоочистки Нововоронежской АЭС-2

дий. Речная (сырая) вода расходом $347 \text{ м}^3/\text{ч}$ прокачивается через фильтр грубой механической очистки с размером отверстий 1 мм, подогревается до $25\text{--}28^\circ\text{C}$ и обрабатывается реагентами — коагулянт и флокулянт для коагуляции коллоидных, как правило, органических примесей и их удаления в виде шлама на узле осветления. Осветленная вода прокачивается через самопромывные механические фильтры с размером ячейки 0,2 мм и направляется после корректировки среды на установку ультрафильтрации для дальнейшего глубокого снижения содержания взвешенных веществ, органических соединений, железа. Согласно предварительной оценке перманганатная окисляемость воды после установки ультрафильтрации должна составлять не более $1,5 \text{ мгО}/\text{дм}^3$ при окисляемости сырой воды $24\text{--}33 \text{ мгО}/\text{дм}^3$. Осветленная вода обрабатывается ультрафиолетовым излучением для обеззараживания и проходит первую ступень обессоливания на установке обратного осмоса, где ее солесодержание снижается с 511 до $5,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$, органические соединения задерживаются почти полностью до менее $0,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$ по органическому углероду. Полученная частично обессоленная вода (пермеат) направляет-

ся на вторую ступень обессоливания на ионитных Н—ОН-фильтрах, где содержание солей снижается еще в 10 раз по отношению к концентрации на входе и в пересчете на электропроводность оценивается $0,25 \text{ мкСм}/\text{см}$. Далее вода проходит фильтр смешанного действия, после которого показатель ее солесодержания в пересчете на электропроводность составит не более $0,1 \text{ мкСм}/\text{см}$, что с запасом отвечает требованиям к добавочной воде АЭС.

Применение в составе водоподготовительной установки мембранной техники позволяет почти полностью задержать содержащиеся в исходной воде органические соединения, что недостижимо другими методами, а также снизить солесодержание обрабатываемой воды на 90%. Одновременно резко снижаются расход химических реагентов и количество сбрасываемых солей.

Опыт применения новых технологий подготовки воды позволяет утверждать, что к настоящему времени разработаны и апробированы в промышленных условиях новые технологии и оборудование для осветления и обессоливания воды. Эти технологии и оборудование во многих случаях обеспечивают значительные экономические и экологические преимущества перед традиционными технологиями обессоливания воды в ядерной энергетике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрова Т.И., Воронов В.Н., Ларин Б.А. Технология организации водно-химического режима атомных электростанций. Учебное пос. для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 264 с.
2. Futselaar H., Schonewille H., Meer W. Direct capillary nanofiltration for surface water. — Desalination, 2003, v. 157, p. 135—136.
3. Юрчевский Е.Б., Первов А.Г., Пичугина М.А. Применению обратноосмотической технологии обессоливания воды в энергетике — 20 лет. — Энергосбережение и водоподготовка, 2009, № 5, с. 2—9.

Поступила в Редакцию 26.12.13