

**Применение мембранных технологий для очистки радиоактивных
вод на атомных электростанциях**

**Застосування мембранних технологій для очищення радіоактивних
вод на атомних електростанціях**

**The use of membrane technologies for the purification of radioactive
water in nuclear power plants**

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук, заведующий
кафедрой «Технологии воды и топлива», Кишневский В. А., Кишневський В. П.,

Kishnevskiy V. A.

Студент – Ярмач А. В., Iarmak A. V.

Аннотация: Приведен анализ работы существующих установок очистки бассейна выгрузки и перегрузки топлива атомных электростанций с ВВЭР. Показаны направления совершенствования существующих установок с использованием современных технологий механической очистки воды методом ультрафильтрации. Приведены технологическая схема и расчет предлагаемой мембранной установки ультрафильтрации (УУФ). Приведены результаты сравнения качества очистки и расходов воды на собственные нужды установок.

Ключевые слова: Борсодержащие радиоактивные воды, бассейн выгрузки и перегрузки топлива, мембраны, ультрафильтрация.

Анотація: Наведено аналіз роботи існуючих установок очистки басейну вивантаження і перевантаження палива атомних електростанцій з ВВЕР. Показані напрямки вдосконалення існуючих установок з використанням сучасних технологій механічної очистки води методом ультрафільтрації. Наведено технологічну схему і розрахунок пропонованої мембранної установки ультрафільтрації (УУФ). Наведено результати порівняння якості очищення і витрат води на власні потреби установок.

Ключові слова: Радіоактивні води, що містять бор, басейн вивантаження і перевантаження палива, мембрани, ультрафільтрація.

Annotation: An analysis is made of the operation of existing installations for cleaning the pool of unloading and refueling of nuclear power plants with WWER. The directions of improving existing installations using modern technologies of mechanical water purification using ultrafiltration are shown. The flow chart and calculation of the proposed ultrafiltration membrane unit are presented. The results of the comparison of the quality of cleaning and water consumption for own needs of installations are given.

Key word: Boron-containing radioactive water, pool unloading and refueling, membranes ultrafiltration.

Физико-химический состав обрабатываемой воды и жесткие требования по анионному и дисперсному составу фильтрата ВПУ системы бассейна выдержки и перегрузки топлива аналогичен системе очистки теплоносителей первого контура. Качество фильтрата обеспечивается комплексной технологией, состоящей из механической и ионной очистки воды от примесей.

В проектном решении ВПУ на действующих АЭС с ВВЭР-1000 для обеспечения качества фильтрата по ионным примесям используются последовательно включенные фильтры, загруженные катионитовой и анионитовой загрузкой. В качестве предвключенных механических фильтров используют в первом контуре фильтр, загруженный титановой крошкой, а для очистки бассейнов выдержки используется предвключенный механический фильтр, загруженный ионообменным материалом, который характеризуется неразвитой поверхностью, предназначенной в данном случае для абсорбции грубодисперсных продуктов коррозии, коллоидных и органических веществ, что не гарантирует низкое качество очистки воды от взвесей. [1]

Эффективность ионообменной части СВО-4, как показывает опыт эксплуатации Запорожской и Балаковской АЭС из-за снижения основных физико-химических показателей используемых ионитов, низкая (табл.1) [2]

Снижение рабочей обменной емкости (РОЕ) катионита происходит за счет деградации сульфатных ионообменных групп материала из-за наведенной радиации, под которой постоянно находится ионообменная смола, вследствие чего в фильтрате также увеличивается концентрация органических веществ. Кроме того, на поверхности зерен ионита в процессе работы из-за низкого качества фильтрата предвключенных механических фильтров образуется слой из абсорбированных продуктов коррозии и органических и коллоидных веществ. Очистка постоянно нарастающего слоя на

поверхности ионитов осуществляется периодическими дополнительными промывками в межрегенерационный период.

Таблица. 1. Результаты испытания фильтрующей загрузки фильтра 0TM20N01 (СК-1) (катионит я.к. марки NRW 100 R Purolite)

Контролируемый показатель	0TM20N01 (СК-1)	Норма по СОУ НАЭК 007:2011
Внешний вид	Деформированные бесцветные зерна	Сферические зерна от светло-желтого до коричневого цвета
Рабочая обменная емкость, мг-экв/см ³	0,3	-
Полная статическая обменная емкость, мг-экв/см ³	0,3	не менее 1,44
Окисляемость, мгО ₂ /г	0,1	не более 0,5
ООУ, мг/дм ³	1,91	-
SO ₄ , мг/дм ³	<0,17	-

За счет снижения РОЕ ионита необходимые частые регенерации. (3-4 раза в год). Потребление реагентов для проведения одной регенерации $\approx 0,77$ т HNO₃ (100%) и $\approx 0,35$ т KOH, потребление ХОВ $\approx 200-270$ м³. [3] Кроме того, для повышения прозрачности воды в период перегрузочных операций производится очистка воды на предвключенных механических фильтрах с частыми промывками фильтрующих материалов (табл. 2). Частота регенераций механического фильтра (МФ) зависит от массовой концентрации Na⁺ после МФ более 1,0 мг/дм³, перепада давления на МФ более 0,8 кгс/см², прозрачности воды после МФ менее 95 %. [3] Количество промывочных вод дает нагрузку на фильтры СВО-3.

Таблица 2. Расход промываемой воды на гидравлические промывки.

	Расход воды во время регенерационного процесса, м ³ /ч	Время проведения регенерационного процесса, ч	Объем воды, необходимый для регенерационного процесса, м ³

Для всей установки (3 фильтра)	10	24	240
Для одного фильтра	10	8	80
Для взрыхления одного фильтра	15	0,02	0,3

С целью повышения надежности и безопасности водно-химического режима БВиП необходимо повысить эффективность работы СВО-4 в части механической очистки воды от продуктов коррозии, коллоидных и органических примесей. Это возможно осуществить заменой предвключенного механического фильтра, загруженного ионообменным материалом, спроектированного без достаточного теоретического обоснования в пятидесятые годы прошлого столетия, на установку механической очистки с применением мембранных технологий. Наиболее приемлемым решением поставленной задачи может быть использование современных технологий ультрафильтрации (УУФ): УУФ с наружным обтеканием полых волокон (рис.1) и УУФ с внутренним обтеканием (рис. 2). [4]

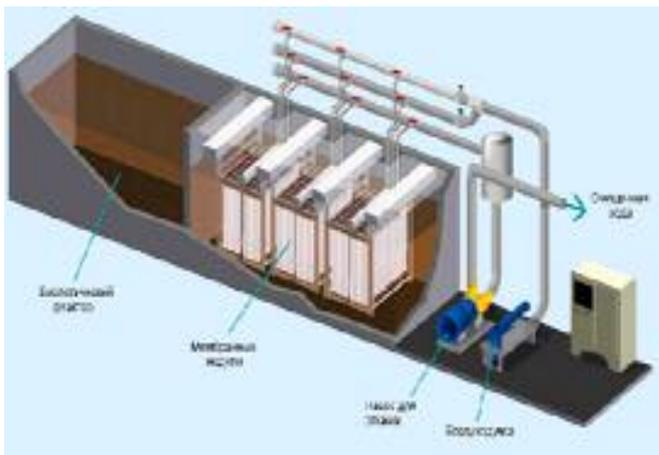


Рис 1. УУФ с наружным обтеканием

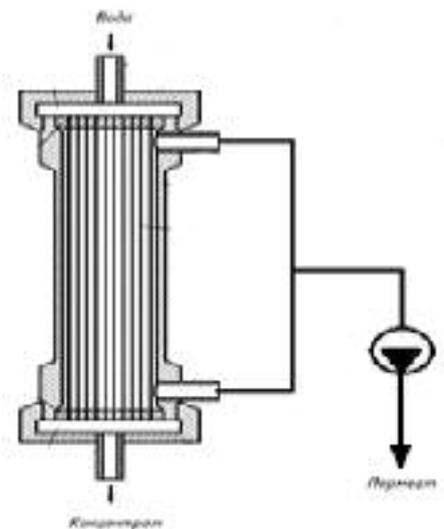


Рис. 2. УУФ с внутренним обтеканием

На основании анализа результатов эксплуатации установок ультрафильтрации рекомендуется установка с внутренним обтеканием, как более компактная (плотность упаковки – $1453 \text{ м}^2/\text{м}^3$), надежная, простая в эксплуатации и исключая в отличие от установки с наружным обтеканием поверхности мембран соприкосновение

обрабатываемой воды с атмосферой и конструктивно не застрахована от возможности непрогнозируемых переливов.

Для обработки воды заданного качества и производительности наиболее приемлемой является установка, отвечающая следующим техническим показателям: производительность 40 м³/ч, площадь 616 м² (8 мембранных элементов (МЭ) по 77 м²), давление – 4,75 бар на входе в модуль, трансмембранное давление – 2,1 бар, температура – до 40°С, проницаемость – 0,065 м³/м²·ч. [5] Сброс концентрата – 5%, то есть 2 м³/ч. Предполагаемый срок эксплуатации больше 5 лет.

За счет особенностей технологии мембранной ультрафильтрации: высокого качества фильтрата при низких расходах на собственные нужды в 5 раз по сравнению с механической фильтрацией на ионитах; срока эксплуатации МЭ, достигающего 5 лет, высокой плотности упаковки мембраны в объеме МЭ. Замена механического фильтра на ультрафильтры позволит уменьшить сброс воды на собственные нужды в 5 раз, количество твердых отходов в 4 раза. (Общий объем 8 МЭ составляет 0,5 м³, а объем загрузки соответствующей производительности механического фильтра 2 м³ (замена раз в 3 года)).

Перед внедрением системы очистки с применением мембранных технологий целесообразно провести промышленные испытания установки с учетом особенностей эксплуатации бассейнов выдержки и перегрузки топлива.

Литература

1. Кишневский В. А. Технологии подготовки воды в энергетике // В. А. Кишневский // Одесса: 2008. - 400 с.
2. Воронов В. Н. Химико-технологические режимы АЭС // В. Н. Воронов, Б. М. Ларин, В. А. Сенина // Москва: издательский дом МЭИ, 2006. - 398 с.
3. Инструкция по эксплуатации системы ТМ очистки вод бассейнов выдержки, перегрузки и аварийного запаса раствора борной кислоты 10.ХЦ.ТМ.ИЭ.07-18
4. Мулдер М. Вступление к мембранной технологии // М. Мулдер // Москва: Мир, 1999. – 514 с.
5. Сайт фирмы DOW - <https://www.dow.com/en-us>