

НАНОФИЛЬТРАЦИОННОЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ РАДИОАКТИВНЫХ РАСТВОРОВ – МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМА ИЗОЛИРУЕМЫХ ОТХОДОВ

А.С. Чугунов, В.А. Винницкий

Санкт-Петербургский государственный технологический институт

(технический университет)

190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26

Р

Применение баромембранных методов очистки в составе комплексов переработки жидких радиоактивных сред все чаще входит в практику обращения с радиоактивными отходами. Приведены результаты сравнительного исследования эффективности работы коммерчески доступных гипер- и нанофильтрационных элементов в условиях непрерывного фосфатирования модельного раствора. Приведены данные по изменению проницаемости, рабочего давления в рассольной камере гипер- и нанофильтрационных аппаратов и солесодержания пермеата при изменении солесодержания в питательном растворе. Показано, что в условиях замкнутого контура по жидким радиоактивным средам как единственно приемлемого при обращении с ними введение полифосфатов для стабилизации истинно растворенных форм существования полизарядных металлов на обратноосмотической мембране ULP ожидаемо приводит к систематическому ухудшению технологических показателей процесса, в первую очередь – проницаемости мембраны при фиксированном давлении в аппарате. В пермеате системы с нанофильтрационной мембраной VNF (Vontron NanoFiltration) наблюдается высокая концентрация солей, указывающая на выведение из контура возникающих при комплексообразовании солей натрия, снижающая таким образом величину осмотического давления раствора, критически влияющую на выход очищенного раствора. Таким образом, нанофильтрация в сочетании с использованием достаточно дешевых хелатообразующих веществ может являться эффективным инструментом для фракционирования компонентов радиоактивных растворов, обеспечивающим достижение нормативных показателей для отводимых вод и подлежащих «вечной» изоляции биологически опасных веществ.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, нанофильтрация, комплексообразование, осмотическое давление, обратный осмос, проницаемость мембраны.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая степень стабильности в работе при минимально возможных массогабаритных характеристиках и объемах подлежащих вечной изоляции радиоактивных отходов является естественным требованием, которое предъявляется к системам переработки жидких радиоактивных сред. В наибольшей степени этому критерию

© А.С. Чугунов, В.А. Винницкий, 2019

отвечают системы непрерывного действия на основе осадительных методов и гиперфильтрации.

Методы, основанные на выделении контролируемых примесей в виде малорастворимых соединений, обладают наибольшей селективностью, но пока и наиболее сложны в организации.

Гиперфильтрация, считающаяся достаточно эффективным методом сокращения объема подлежащих контролируемому хранению или кондиционированию радиоактивных отходов сложного и нерегулярного состава [1 – 5], обладает рядом отрицательных с точки зрения организации рассматриваемых процессов моментов:

- увеличение объема подлежащих «вечной» изоляции отходов за счет включения в их состав экологически безвредных веществ – гидрокарбонатов, хлоридов и сульфатов натрия, калия, магния и кальция, которые на законных основаниях могут быть отведены в гидрографическую сеть региона;

- ограничение допустимой концентрации рассола по целевым компонентам, что связано с необходимостью поддержания движущей силы процесса, пропорциональной разности между напором насоса и осмотическим давлением, определяемым суммарной концентрацией ионов.

Использование технологических приемов для разделения компонентов подлежащих переработке растворов по степени биологической опасности и экологического воздействия позволяет повысить технологическую устойчивость системы в целом за счет распределения веществ по ступеням очистки и решить основные задачи промышленного водообеспечения:

- возврат в производственный цикл основной массы воды;
- отведение из производственного процесса основной части техногенных загрязнений, представленных в первую очередь используемыми или образующимися в технологических процессах солями щелочных металлов;

- локализация и концентрирование биологически опасных компонентов, представленных в большинстве случаев солями цветных металлов и активированными продуктами коррозии с последующим отведением образующихся растворов на переработку осадительными методами;

- увеличение наполняемости сорбентов $^{134,137}\text{Cs}$ за счет снижения конкуренции за сорбционные места со стороны полизарядных катионов.

Наиболее перспективным для фракционирования компонентов техногенных вод на группы со схожими химическими свойствами представляется использование нанофильтрационных элементов. В отличие от гиперфильтрационных (обратноосмотических) мембран селективность нанофильтрационных мембран определяется свойствами присутствующих в растворе солей: минимальная (40 – 70%) для солей щелочных металлов и максимальная (90 – 95%) для солей полизарядных металлов [6] с присущей им достаточно жесткой гидратной оболочкой. По сути эти мембраны могут быть отнесены к своеобразным «молекулярным ситам», способным обеспечить сортировку компонентов по размеру молекул.

Селективность даже в 95% означает гарантированный переход в пермеат части ионов полизарядных металлов, а в их числе – активированных продуктов коррозии и деления. Поэтому представляется разумным исключить саму вероятность их переноса за счет резкого увеличения размера молекул, включающих в себя ионы полизарядных металлов, что может быть реализовано образованием их комплексов с большиеразмерными лигандами.

Целью работы являлось сравнительное исследование эффективности технологий переработки радиоактивно загрязненных растворов на основе коммерчески доступных гипер- и нанофильтрационных аппаратов в режиме гарантированного

исключения переноса полизарядных металлов, обеспечивающих получение приемлемой для «вечной» изоляции формы радиоактивных отходов и вовлечения основной массы техногенно и радиоактивно загрязненных вод в промышленный оборот.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Система выполнена из трех блоков, способных работать автономно.

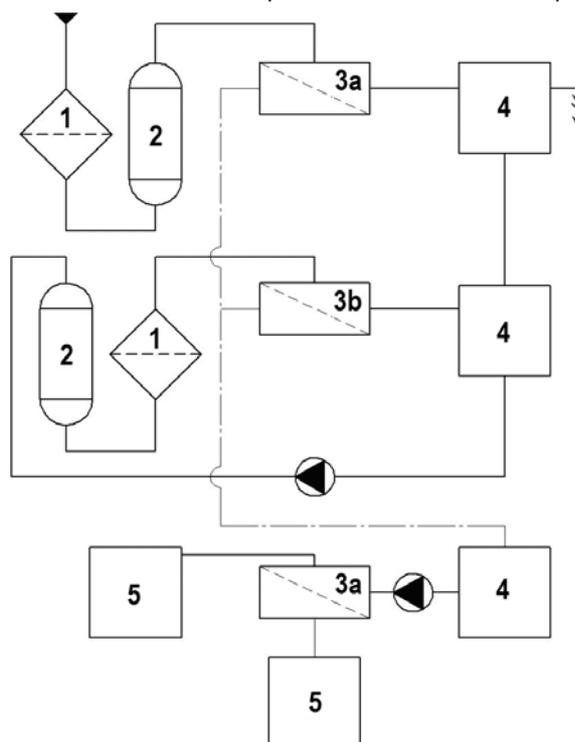


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – микрофильтр; 2 – солерастворитель; 3а – гиперфильтрационный аппарат; 3б – гиперфильтрационный (нанофильтрационный) аппарат; 4 – промежуточная емкость; 5 – контрольная емкость

Первая ступень переработки включала в себя микрофильтр из волоконистого полипропилена стандарта SL-10' с декларированным размером пор 1,0 мкм, солерастворитель для дозирования комплексона и гиперфильтрационный элемент «Vontron» серии 1812-100. Питательным раствором служила водопроводная вода сети Санкт-Петербурга, подаваемая на вход микрофильтра с допустимым для устойчивой работы элемента в режиме низконапорной гиперфильтрации давлением $0,32 \pm 0,02$ МПа. Пермеат собирался в питательной емкости финишной ступени, а концентрат – в промежуточной емкости, снабженной переливным устройством для поддержания постоянного уровня питательного раствора, откуда самотеком передавался в питательную емкость второй ступени.

Вторая ступень представляла собой контур концентрирования биологически опасных компонентов и включала в себя

- приемно-питательную емкость;
- питательный мембранный насос марки DLX с производительностью $15 \text{ дм}^3/\text{ч}$ при давлении до 0,55 МПа;
- солерастворитель для непрерывного дозирования лигандов;
- микрофильтр для защиты поверхности мембраны от вероятного механического воздействия образующихся в процессе дисперсных частиц.

Для сравнительных исследований на второй ступени переработки использовались конструктивно одинаковые мембранные элементы «Vontron» серии 1812-50 с площадью мембраны 0,32 м² – гиперфильтрационный ULP и нанофильтрационный VNF.

Пермеат с этой ступени отводится в приемную емкость финишной ступени, обеспечивающей получение чистой воды для собственных нужд и отводимого в виде сточной воды концентрата. Разделительным элементом служил гиперфильтрационный элемент «Vontron» серии 1812-50.

Соотношения потоков пермеата и концентрата и рабочее давление в камере продувки обеспечивались контроллерами дренажа требуемой величиной расхода. На второй ступени очистки дополнительно установлен перепускной клапан с давлением срабатывания 0,5 МПа, обеспечивающий защиту питательного насоса от перегрузки.

Для оперативного контроля изменения общей концентрации солей в потоках использовались кондуктометрические солемеры TDS Meter DM1 (TDS-метры).

Концентрации компонентов в пермеате контролировались общеизвестными методами [7]: общая жесткость и концентрация ионов кальция – трилонометрически, цветных металлов – фотоколориметрически с предварительным ионообменным концентрированием на водородной форме катионита DOWEX-50-8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены усредненные показатели качества использованной в экспериментах воды городской водопроводной сети Санкт-Петербурга и полученного из нее питательного раствора для второй ступени переработки. Следует отметить, что по фиксируемым в этом растворе концентрациям ионов цветных металлов только соединения железа вписываются в установленные для вод рыбохозяйственных водоемов нормативы качества. Таким образом, даже для отведения из производственного цикла таких маломинерализованных вод уже требуется проведение инженерных мероприятий по коррекции их минерального состава.

Теоретически гиперфильтрация из техногенных вод с таким солесодержанием позволяет выделить ~ 95 – 98% достаточно чистой и легко кондиционируемой до практически любых требуемых норм воды. Однако при проточном концентрировании высока вероятность самопроизвольного выделения в объеме аппаратов и на поверхностях мембран оксигидратов, в первую очередь – железа (III), и карбонатов щелочно-земельных и цветных металлов. Отметим, что эти металлы являются носителями, с которыми выделяются их радиоактивные химические аналоги – активированные продукты коррозии (в первую очередь – ⁶⁰Co) и некоторые продукты деления (⁹⁰Sr). Это снижает допустимую степень сокращения объема перерабатываемых радиоактивных растворов.

Нанофильтрационные элементы как своеобразные «молекулярные сита» обладают значительно более низкой селективностью по отношению к простым ионным формам солей, чем гиперфильтрационные мембраны. Это создает условия для разделения присутствующих в растворе компонентов и управления процессом за счет изменения размера молекул в условиях образования различных комплексных форм с полизарядными катионами. Гарантированно это может быть обеспечено за счет использования комплексонов. Отметим, что применение органических комплексонов, таких как ЭДТА-ионы, имеет ряд отрицательных моментов. Например, достаточно высокая растворимость этих соединений [8] усложняет их выведение из технологических сред для обеспечения критериев приемлемости радиоактивных отходов для захоронения [9]. Наиболее приемлемым с точки зрения соотношения цена/эффект [10] методом увеличения селективности нанофильтрации представляется образование хелатоподобных структур ионами поливалентных металлов с полифосфатами (табл. 2).

Таблица 1

Показатели раствора в контуре циркуляции при переходе процесса в стационарный режим

Показатель	Сетевая вода	Питательный раствор второй ступени
Солесодержание по TDS-метру, мг/дм ³	31	72
pH	6,85	6,82
Na ⁺ , мг/дм ³	7	14
Щелочность общая, мэкв/дм ³	0,85	2,2
Жесткость общая, мэкв/дм ³	0,68	1,75
Ca ²⁺ , мг/дм ³	12	25
Mn ²⁺ , мг/дм ³	0,09	0,24
Fe(II)+ Fe(III), мг/дм ³	0,25	0,11
Co ²⁺ , мг/дм ³	НПО	НПО
Ni ²⁺ , мг/дм ³	НПО	0,03
Cu ²⁺ , мг/дм ³	НПО	0,02
Zn ²⁺ , мг/дм ³	НПО	НПО
Cl ⁻ , мг/дм ³	17	16
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,4	1,4
Примечание. НПО – ниже предела определения		

Таблица 2

Значения констант устойчивости (lg K_{уст}) комплексных форм некоторых линейных полифосфатов с катионами щелочно-земельных и цветных металлов [10]

Центральный атом	Лиганды		
	Пирофосфат-	Триполифосфат-	Тетраполифосфат-
Mg ²⁺	7,2	8,6	6,04
Ca ²⁺	6,8	8,1	5,46
Mn ²⁺		7,15	
Co ²⁺	6,1	6,94	
Ni ²⁺	5,94	6,75	
Cu ²⁺	7,6	8,3	9,44
Zn ²⁺	8,7	7,5	

Перевод полифосфатов в практически нерастворимые ортофосфаты, полностью совместимые с цементными матрицами, может быть при необходимости проведен термогидролизом, в то время как для разрушения органических фосфатов придется использовать достаточно сложные и дорогие системы окислительного гидролиза, например, предлагаемые для переработки накопленных кубовых остатков на АЭС.

Как следует из данных на рис. 2, такие достаточно высокие значения констант обеспечивают практически полный перевод всех ионов металлов в хелатные комплексные формы уже при практически стехиометрическом количестве лигандов.

Дозирование комплексообразующих веществ (так называемых антискалянтов) широко используется как метод предотвращения образования отложений в гиперфильтрационных технологиях получения чистой воды.

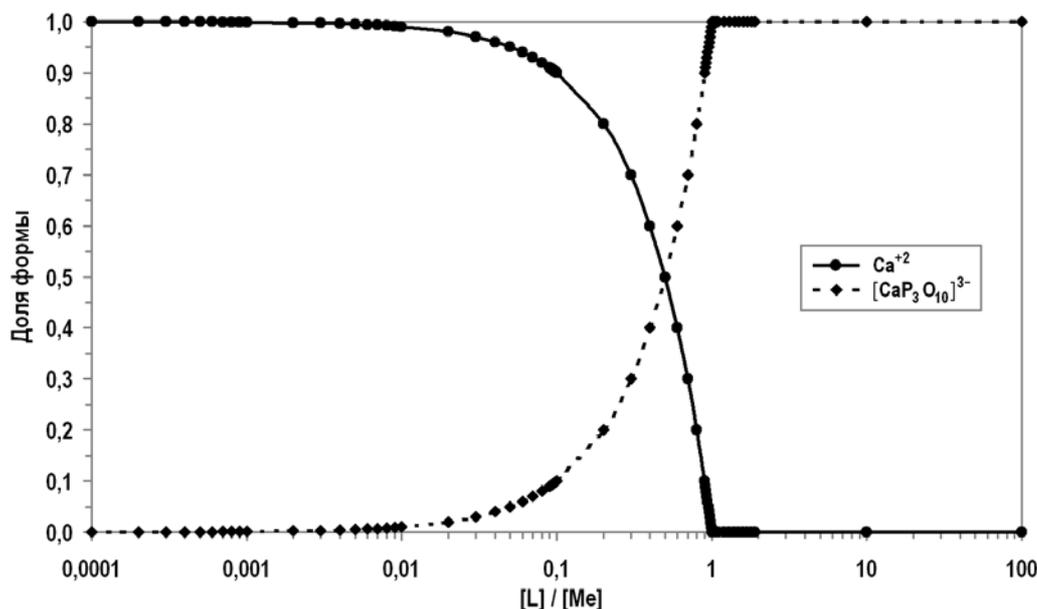


Рис. 2. Распределение комплексных форм триполифосфата кальция

Для фосфатирования раствора на данном этапе использовалась полифосфатная загрузка для бытовых умягчителей воды БФ (ТУ 3697-023-48981941-2014), низкая скорость растворения которой позволила использовать простейшие дозаторы лигандов – солерастворители, увеличивая таким образом надежность работы системы в целом.

Следует отметить и еще одно достоинство при использовании этих соединений для переработки техногенных вод – продуктами их гидролиза являются ортофосфат-ионы, образующие с катионами Ca²⁺ и d-металлов малорастворимые и совместимые со всеми минеральными связующими, рекомендуемыми для кондиционирования радиоактивных отходов, соли. В качестве щелочного агента целесообразно использовать известковое «молоко» и промышленно выпускаемое оборудование, например, аппараты с «рубашкой» и перемешивающим устройством.

Поэтому наиболее перспективными для переработки техногенно и радиоактивно загрязненных вод мембранными методами представляются системы с рециклом питательного раствора, позволяющие обеспечить

- сокращение количества устанавливаемых баромембранных аппаратов;
- стабилизацию растворимых форм за счет связывания ионов поливалентных металлов в устойчивые комплексные соединения, обеспечивающую возможность достижения высокой степени пересыщения раствора при отведении пермеата;
- условия для выделения кристаллических двойных солей из пересыщенного раствора;
- снятие концентрационной поляризации и уменьшение вероятности образования отложений за счет поддержания высокой скорости раствора в рассольной камере;
- эффективную защиту рабочего слоя мембран от истирания дисперсными частицами предварительной микро- или ультрафильтрацией.

Так как проницаемость солезадерживающих мембран и качество фильтрата определяется разностью между осмотическим давлением π , рассчитываемым по уравнению Ван-Гоффа

$$\pi = RT \sum C_i$$

(R – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура раство-

ра; C_i – концентрация осмотически активных частиц, моль/дм³) и рабочим давлением в камере концентрирования, то логично использовать в качестве аргумента непосредственно измеряемые показания TDS-метра. Понятно, что измеряемая этими приборами величина не может быть непосредственно пересчитана в мольную шкалу концентраций солей, но позволяет проследить характер изменения технологических параметров. Следует принять и тот факт, что такие приборы контроля являются штатными для практически всех систем водоподготовки и водоочистки.

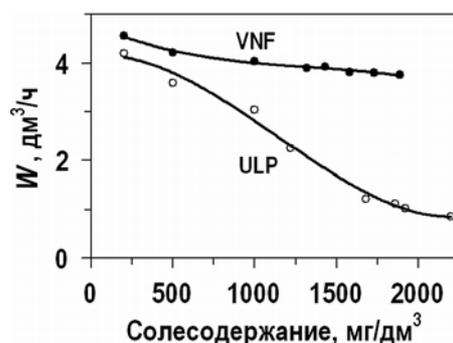


Рис. 3. Изменение проницаемости (W) мембран в зависимости от солеcодержания в питательном растворе

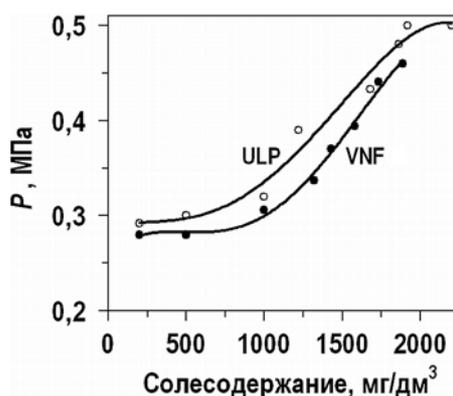


Рис. 4. Изменение рабочего давления (P) в рассольной камере в зависимости от солеcодержания в питательном растворе

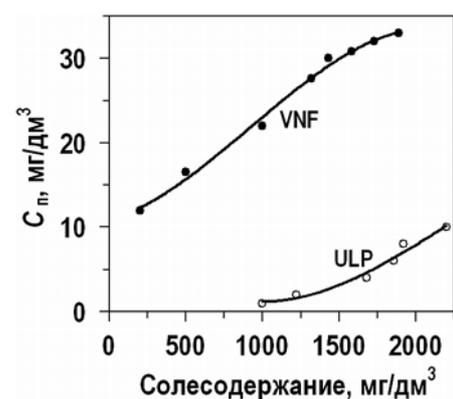


Рис. 5. Изменение солеcодержания пермеата (C_p) в зависимости от солеcодержания в питательном растворе

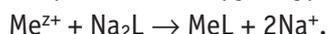
На рисунках 3 – 5 приведены данные по изменению основных технологических параметров в процессе сравнительных испытаний рассматриваемых систем переработки.

Поведение гиперфильтрационного элемента в рассматриваемых условиях полностью укладывается в рамки существующих представлений [11].

Высокая селективность мембраны по ионным примесям приводит к систематическому накоплению всех компонентов в питающем мембранный аппарат растворе, снижая движущую силу процесса фильтрации и проницаемость мембраны. При постоянном расходе поступающего на вход аппарата раствора это приводит к увеличению нагрузки на контроллер, что вызывает возрастание давления в рассольной камере, частично компенсирующее влияние изменения осмотического давления. Результирующим является плавное снижение проницаемости мембраны в процессе переработки техногенных вод с накоплением растворимых компонентов.

Можно принять, что в этом интервале концентрации солей селективность мембраны постоянна. Следовательно, накопление солей щелочных металлов в циркулирующем растворе приводит к увеличению скорости массопереноса ионов через разделительную мембрану, что при достаточно высоких концентрациях электролитов начинает замедлять темп уменьшения проницаемости (см. рис. 3).

В этом плане введение комплексонов для стабилизации форм существования щелочно-земельных и цветных металлов в обязательном порядке приведет к ухудшению технологических показателей процесса переработки. Так реакция образования комплексной формы с полифосфат-ионами и другими комплексоном протекает в эквимольном соотношении, и может быть представлена брутто-уравнением



Таким образом, связывание одного моля осмотически активных двух- и трехзарядных катионов приводит к образованию трех молей осмотически активных частиц и, следовательно, трехкратному возрастанию осмотического давления.

Для системы с нанофильтрационной мембраной наблюдаются другие тенденции. Концентрация солей в пермеате этих аппаратов значительно превышает этот показатель не только для гиперфильтрации, но и для поступающего на эту стадию переработки раствора. Это указывает на выведение из концентрата образующихся при комплексообразовании солей натрия. Таким образом, осмотически активными частицами являются преимущественно образовавшиеся комплексонаты, по отношению к которым гиперфильтрационная мембрана и проявляет свойства полупроницаемой.

В пермеатах исследованных систем не фиксировались аналитически значимые концентрации солей щелочно-земельных и цветных металлов, что свидетельствует об образовании в растворе комплексных соединений, к которым нанофильтрационная мембрана обладает высокой (не менее 99,9%) селективностью при практически незначимой солезадерживающей способности солей щелочных металлов. Очевидно, что при переработке радиоактивных растворов отводимый с этой ступени переработки концентрат обязан содержать в своем составе радионуклиды $^{134,137}\text{Cs}$. Методы глубокой очистки растворов солей щелочных металлов от этих соединений достаточно хорошо известны и технически отработаны [1, 2, 12 – 17].

Таким образом, нанофильтрационный узел способен обеспечить условия, необходимые для минимизации объема подлежащих «вечной» изоляции радиоактивных отходов.

Установка третьей ступени очистки, обеспечивавшей получение воды с качеством, превосходящим определяемое ГОСТ 6709-72 качество дистиллированной воды, целесообразна только для получения воды высокой чистоты. При давлении 0,5 МПа степень конверсии выдаваемого с узла разделения раствора составляла 85 – 90% при селективности мембраны не менее 99,8%. В этом случае будет наблюдаться и десятикратное повышение удельной активности по ^{137}Cs подлежащего отведению в гидрографическую сеть концентрата. Для обеспечения нормативных требований этот раствор целесообразно направлять на фильтр-гарантер нанофильтрационных аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные показывают, что использование систем на основе промышленно выпускаемых аппаратов нанофильтрации в сочетании с широкодоступными и достаточно дешевыми комплексонами позволяет решить основную задачу обеспечения их глубокой очистки – фракционирования жидких радиоактивных отходов. Наличие освоенной промышленностью элементной базы способно в кратчайшие сроки снять проблему создания экономичных и экологически безопасных систем переработки техногенно и радиоактивно загрязненных вод, в том числе содержащих техногенные и природные лиганды, усложняющие организацию систем сорбционной очистки [18].

Результаты получены в ходе выполнения Проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности № 13.6572.2017/8.9.

Литература

1. *Василенко В.А., Ефимов А.А., Епимахов В.Н. и др.* Обращение с радиоактивными отходами в России и странах с развитой атомной энергетикой. / Под ред. В.А. Василенко. – СПб.: ООО «НИЦ Моринтех», 2005. – 304 с.
2. *Рябчиков Б.Е.* Очистка жидких радиоактивных отходов. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 515 с.
3. *Ambashta R.D., Sillanpaa M.E.T.* Membrane purification in radioactive waste management: a short review // *Journal of environmental radioactivity*. – 2012. – Vol. 105. – PP. 76-84.
4. *Zakrzewska-Trznadel G., Harasimowicz M., Chmielewski A.G.* Membrane processes in nuclear technology-application for liquid radioactive waste treatment // *Separation and purification technology*. – 2001. – Vol. 22-23. – PP. 617-625.
5. *Rabby A.K.* Membrane techniques for treatment in nuclear waste processing: global experience // *Membrane technology*. – 2008. – Iss. 11. – PP. 9-13.
6. *Аржанова Е.Б., Гладуш М.Г., Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е.* Разделение моно- и поливалентных ионов методом нанофильтрации в водных растворах высокой концентрации // *Перспективные материалы*. – 2010. – № 8. – С. 183-188.
7. *Унифицированные методы анализа вод.* / Под ред. Ю.Ю. Лурье. Изд. 2-е, испр. – М.: Химия, 1973. – 376 с.
8. *Никитин В.Д., Якимец Е.М., Тимакова Н.А. и др.* Получение внутрикомплексных соединений этилендиаминтетрауксусной кислоты с катионами некоторых металлов и методы их анализа // *Сб. трудов Уральского политехнического института им. С.М. Кирова «Применение трилона Б в анализах цветных сплавов»*. – Свердловск, 1963. – С. 94-103.
9. *Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.* НП-093-14 // *Ядерная и радиационная безопасность*. – 2015. – № 3 (77). – С. 59-82.
10. *Жданов Ю.Ф.* Химия и технология полифосфатов. – М.: Химия, 1979. – 240 с.
11. *Дытнерский Ю.И.* Баромембранные процессы. Теория и расчет. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
12. *Шведов В.П., Иванова Л.М., Жариков В.И.* Выделение радиоактивного цезия из морской воды. I. Выделение цезия в виде соединений с ферроцианидами цинка, меди и никеля // *Радиохимия*. – 1963. – Т. 5. – № 2. – С. 182-185.
13. *Иванова Л.М., Шведов В.П.* Выделение радиоактивного цезия из морской воды. II. Выделение цезия в виде соединений с ферроцианидами щелочно-земельных элементов // *Радиохимия*. – 1963. – Т. 5. – № 2. – С. 185-189.
14. *Sharygin L.M., Muromskii A.Yu., Moiseev V.E. et al.* Sorption purification of liquid radioactive wastes from nuclear power plants // *Atomic Energy*. – 1997. – Vol. 83. – Iss. 1. – PP. 493-499.
15. *Sharygin L.M., Muromskii A.Y.* Inorganic sorbent for selective treatment of liquid radioactive wastes // *Radiochemistry*. – 2004. – Vol. 46. – Iss. 2. – PP. 185-189.
16. *Savkin A.E.* Development and trials of a technology for reprocessing of NPP liquid radioactive wastes // *Radiochemistry*. – 2011. – Vol. 53. – Iss. 5. – PP. 555-558.
17. *Нечаев А.Ф., Чугунов А.С., Степанов Е.А.* Модернизация технологической платформы

глубокой переработки радиоактивных отходов // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2010. – № 8 (34). – С. 66-70.

18. *Vinnitskii V.A., Nechaev A.V., Chugunov A.S.* Role of simple anionic ligands in deep decontamination of liquid radioactive waste // *Radiochemistry*. – 2016. – Vol. 58. – No.3. – PP. 311-316.

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

Авторы

Чугунов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник
E-mail: tchugunov@mail.ru

Винницкий Вадим Александрович, старший преподаватель
E-mail: ivinnicciy@gmail.com

UDC 621.039.73

NANOFILTRATION FRACTIONATION OF COMPONENTS OF RADIOACTIVE SOLUTIONS – METHOD OF REDUCING THE VOLUME OF WASTE

Chugunov A.S., Vinnitsky V.A.

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)
26 Moskovsky Prospekt, Saint-Petersburg, 190013 Russia

ABSTRACT

Baromembrane purification methods in the composition of liquid radioactive medium processing complexes are increasingly included in the practice of radioactive waste management. The results of a comparative study of the efficiency of the operation of nanofiltration and reverse osmosis (RO) elements under conditions of continuous phosphatization of a model solution are presented. Dependences on the change in permeability, working pressure in the brine chamber of the RO and nanofiltration apparatus and the salt content of the permeate are shown when the salt content in the nutrient solution varies. It is shown that under the conditions of a closed loop in liquid radioactive medium, the introduction of polyphosphates to stabilize the truly dissolved forms of the existence of multiply-charged metals on the reverse osmotic membrane of ULP leads to a systematic deterioration of the permeability of the membrane at a fixed pressure in the apparatus. In the permeate of the system with a nanofiltration membrane VNF (Vontron NanoFiltration) contains a sufficiently high concentration of salts, which indicates the removal of sodium salts from the circuit, thereby reducing the osmotic pressure of the solution, which critically affects the yield of the purified solution. Thus, nanofiltration in combination with chelating agents can be an effective tool for fractionation of components of radioactive solutions, ensuring the achievement of regulatory indicators for wastewater and biologically hazardous substances that are «eternal» insulated.

Key words: radioactive waste, radwaste, nanofiltration, complexation, osmotic pressure, reverse osmosis, RO, membrane permeability.

REFERENCES

1. *Vasilenko V.A., Yefimov A.A., Yepimakhov V.N., Konstantinov Ye.A., Stepanov A.I., Stepanov I.K.* *The management of radioactive waste in Russia and countries with developed nuclear power.* Saint-Petersburg. Morintekh Publ., 2005, 304 p. (in Russian).

2. Rjabchikov B.E. *Decontamination of liquid radioactive waste*. Moscow. DeLi print Publ., 2008, 515 p. (in Russian).
3. Ambashta R.D., Sillanpaa M.E.T. Membrane purification in radioactive waste management: a short review. *Journal of environmental radioactivity*. 2012, v. 105, pp. 76-84.
4. Zakrzewska-Trznadel G., Harasimowicz M., Chmielewski A.G. Membrane processes in nuclear technology-application for liquid radioactive waste treatment. *Separation and purification technology*. 2001, v. 22-23, pp. 617-625.
5. Pabby A.K. Membrane techniques for treatment in nuclear waste processing: global experience. *Membrane technology*. 2008, iss. 11, pp. 9-13.
6. Arzhanova E.B., Gladush M.G., Panteleev A.A., Rjabchikov B.E. Separation of mono and polyvalent ions by the method of nanofiltration in aqueous solutions of high concentration. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 8, pp. 183-188 (in Russian).
7. *Standardized methods for water analysis*. Ed. Yu.Yu. Lur'e. Moscow. Khimiya Publ., 1973, 376 p. (in Russian).
8. Nikitin V.D., Jakimec E.M., Timakova N.A., Rad'ko V.A., Shabashova N.V., Tribunskij V.V. Preparation of chelate compounds of ethylenediaminetetraacetic acid with cations of some metals and methods for their analysis. *Sbornik trudov Ural'skogo politehnicheskogo instituta im. S.M. Kirova «Primenenie trilonov B v analizakh cvetnykh splavov»*. Sverdlovsk. 1963, pp. 94-103 (in Russian).
9. Criteria for acceptability of radioactive waste for disposal. NR-093-14. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*, 2015, no. 3(77), pp. 59-82 (in Russian).
10. Zhdanov Yu.F. *Chemistry and technology of polyphosphates*. Moscow. Khimiya Publ., 1979, 240 p. (in Russian).
11. Dytnerskij Yu.I. Baromembrane processes. Theory and estimation. Moscow. Khimiya Publ., 1986, 272 p. (in Russian).
12. Shvedov V.P., Ivanova L.M., Zharikov V.I. Isolation of radioactive cesium from sea water. I. Isolation of cesium in the form of compounds with ferrocyanides of zinc, copper and nickel. *Radiokhimiya*, 1963, v. 5, no. 2, pp. 182-185 (in Russian).
13. Ivanova L.M., Shvedov V.P. Isolation of radioactive cesium from sea water. II. Isolation of cesium in the form of compounds with ferrocyanides of alkaline earth elements. *Radiokhimiya*, 1963, v. 5, no. 2, pp. 185-189 (in Russian).
14. Sharygin L.M., Muromskii A.Yu., Moiseev V.E., Tsekh A.R., Vaver A.V. Sorption purification of liquid radioactive wastes from nuclear power plants. *Atomic Energy*, 1997, v. 83, iss. 1, pp. 493-499.
15. Sharygin L.M., Muromskii A.Y. Inorganic sorbent for selective treatment of liquid radioactive wastes. *Radiochemistry*, 2004, v. 46, iss. 2, pp. 185-189.
16. Savkin A.E. Development and trials of a technology for reprocessing of NPP liquid radioactive wastes. *Radiochemistry*, 2011, v. 53, iss. 5, pp. 555-558.
17. Nechaev A.F., Chugunov A.S., Stepanov E.A. Modernization of technological platform for deep processing of radioactive wastes. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2010, no. 8 (34), pp. 66-70 (in Russian).
18. Vinnitskii V.A., Nechaev A.V., Chugunov A.S. Role of simple anionic ligands in deep decontamination of liquid radioactive waste. *Radiochemistry*, 2016, v. 58, no. 3, pp. 311-316.

Authors

Chugunov Aleksandr Sergeyevich, Senior Researcher

E-mail: tchugunov@mail.ru

Vinnitsky Vadim Aleksandrovich, Senior Lecturer

E-mail: ivinnicciy@gmail.com