

Охрана окружающей среды

УДК 504.5:628.33

Гомеля Н.Д., докт. техн. наук, проф., **Иванова В.П.**, аспирант
Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, Киев
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: m.gomelya@kpi.ua, veronika_m_p@ukr.net

Оценка эффективности баромембранных методов при очистке воды от ионов тяжелых металлов

Изучены процессы мембранной очистки воды от ионов тяжелых металлов из сильно разбавленных растворов. Показано, что производительность нанофильтрационной мембраны ОПМН-П при фильтровании сильно разбавленных растворов сульфата кадмия в основном зависит от рабочего давления и близка к показателям, полученным при использовании дистиллированной воды. При выделении ионов меди, кадмия и свинца при концентрациях около $0,1 \text{ мг/дм}^3$ селективность мембраны была очень низкой и не превышала 10 %. При использовании комплексонов в некоторых случаях селективность мембраны достигала 100 % при снижении исходной концентрации ионов металлов до 10^{-8} мг/дм^3 . При этом ионы металлов накапливались в концентратах в эквивалентных количествах, что важно при концентрировании растворов ионов металлов при анализе сверхразбавленных растворов. *Библ. 11, рис. 7, табл. 3.*

Ключевые слова: нанофильтрация, мембраны, тяжелые металлы, пермиат, концентрат, очистка воды.

Загрязнение природных водоемов ионами тяжелых металлов является достаточно острой проблемой несмотря на значительные научные и технические достижения в области очистки природных и сточных вод [1]. Во многих случаях при мониторинге водных объектов используются недостаточно точные методы и приборы контроля для оценки истинного состояния водоемов. Кроме того, почти не учитывается возрастание концентрации тяжелых металлов в воде при эвтрофикации водоемов.

Согласно [2], концентрация ионов тяжелых металлов в природных водоемах Николаевской обл. иногда превышает допустимую концентрацию для водоемов рыбохозяйственного назначения. При эвтрофикации водоемов содержание

некоторых тяжелых металлов в Днепро-Бугском лимане превышает ПДК в 2–5 раз [3]. В отдельных водоемах концентрация тяжелых металлов около 5 мг/дм^3 [4]. Обусловлено это накоплением тяжелых металлов в донных отложениях, концентрированием их в гидробионтах и обратным переходом в воду после разложения отмирающих растений, водорослей, фито- и зоопланктона вследствие эвтрофикации водоемов [5]. Эти пульсации концентрации тяжелых металлов в воде возможны до тех пор, пока они поступают в воду и присутствуют в донных отложениях. Значительное влияние на уровень содержания тяжелых металлов в водоемах оказывают и атомные электростанции [6, 7].

Учитывая высокий уровень токсичности тяжелых металлов, на сегодня актуальной является проблема создания процессов глубокой очистки воды от ионов тяжелых металлов. Это касается и водоподготовки, и очистки сточных вод. Кроме того, очень важным является создание эффективных процессов концентрирования сильно разбавленных растворов ионов тяжелых металлов для повышения точности их определения доступными методами анализа.

Цель данной работы — определение эффективности нанофильтрации при очистке разбавленных растворов ионов тяжелых металлов, создание эффективных, высокоточных методов концентрирования ионов тяжелых металлов для повышения точности их аналитического контроля.

В работе использовали ячейку для баромембранной очистки воды объемом 1 дм³, рассчитанную на работу при давлении до 5 атм. В ячейку помещали мембрану ОПМН-П диаметром 12 см. Давление создавали компрессором, контролировали с помощью манометра и регулировали с помощью крана для сброса избыточного давления.

В качестве модельных использовались растворы сульфата меди, сульфата кадмия и нитрата свинца в дистиллированной воде с концентрацией от 1 до 1·10⁻⁸ мг/дм³ по ионам металлов. Кроме того, использовались модельные растворы сульфата меди в водопроводной воде с концентрацией 1·10⁻³–1·10⁻⁸ мг/дм³.

Концентрацию ионов тяжелых металлов определяли методом инверсионной хронопотенциометрии [8].

В качестве комплексонов использовали нитрилтриметиленфосфоновую кислоту (НТМФК), оксиэтилендифосфоновую кислоту (ОЭДФК), их натриевые соли, трилон Б, диэтилдитиокарбаминат натрия (ДДТН), полигексаметиленполигуанидина гидрохлорид (Акватон).

Характеристики водопроводной воды:

Ж	–	4,0–5,2 мг-экв/дм ³
С _{Ca²⁺}	–	3,0–3,6 мг-экв/дм ³
С _{Mg²⁺}	–	0,6–1,0 мг-экв/дм ³
Щ	–	4,1–5,0 мг-экв/дм ³
С _{Cl⁻}	–	27–40 мг/дм ³
С _{SO₄²⁻}	–	30–45 мг/дм ³
рН	–	7,0–7,5

Для определения продуктивности мембраны пробы дистиллированной воды и растворы металлов объемом 1 дм³ помещали в ячейку и, поднимая давление до 0,15–0,4 МПа, определяли продуктивность мембраны в зависимости от степени отбора пермиата, объема пермиата

и время фильтрования. При изучении зависимости селективности мембраны от степени отбора пермиата при фильтровании растворов солей металлов отбирали пробы пермиата, фиксируя время фильтрования и определяя в пермиате концентрации металлов. В случае водопроводной воды в пермиате определяли остаточное содержание тяжелых металлов и ионов жесткости.

Одним из наиболее простых и распространенных методов концентрирования неорганических соединений в водных растворах является метод дистилляции. Однако при очень низких концентрациях ионов металлов возникает необходимость упаривать очень большие объемы воды, что делает метод громоздким и непрактичным. Кроме того, при упаривании металлы частично улетучиваются с водяным паром, и при низких концентрациях металлов это приводит к значительному возрастанию ошибки опыта.

При использовании обратного осмоса значительная часть концентрата находится в коммуникациях установки, часть металлов сорбируется мембраной, что усложняет установление количественных соотношений содержания металлов в растворах, концентратах и пермиатах. Кроме того, осмотическое концентрирование металлов предусматривает использование давления более 5–10 бар.

Наиболее простым и надежным методом является нанофильтрация, где в ячейке просто разделяется исходный раствор на пермиат и концентрат [9]. На примере ионов жесткости показано, что селективность нанофильтрационной мембраны ОПМН-П невысокая и изменяется в пределах от 50 до 87 % в зависимости от рН среды. В слабокислых растворах селективность мембраны ниже [10]. Однако использование комплексонов позволяет существенно повысить эффективность выделения металлов из водных растворов даже в процессах ультрафильтрации [11].

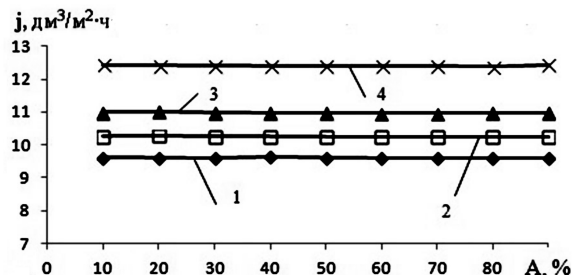


Рис. 1. Зависимость продуктивности мембраны ОПМН-П от степени отбора пермиата при фильтровании растворов сульфата кадмия концентрацией 0,125 мг/дм³ по Cd²⁺ при давлении, МПа: 1 – 0,15; 2 – 0,22; 3 – 0,30; 4 – 0,40.

Результаты по определению производительности мембраны ОПМН-П в зависимости от рабочего давления и степени отбора пермиата приведены на рис.1. В данном случае производительность зависит от рабочего давления и практически не зависит от степени отбора пермиата и концентрации соли металла. Объясняется это очень низкой концентрацией соли, а значит, и соответственно очень низким осмотическим давлением, которое ничтожно мало при концентрациях $0,1-1,0 \text{ мг/дм}^3$.

Как видно из рис.2, 3, при концентрациях ионов меди, кадмия и свинца соответственно $0,100; 0,125; 0,080$ и $0,082 \text{ мг/дм}^3$ эффективность очистки воды от ионов тяжелых металлов на нанофильтрационной мембране была очень низкой, что можно объяснить высоким уровнем разбавления растворов. Селективность мембраны достигала $4,8 \%$ для ионов кадмия, $6,0 \%$ для меди и $6,1 \%$ для свинца. При pH $2,66$ для свинца селективность падала до $2,26 \%$.

Селективность мембраны существенно увеличивается при использовании комплексообразователей. Так, при использовании Трилона Б

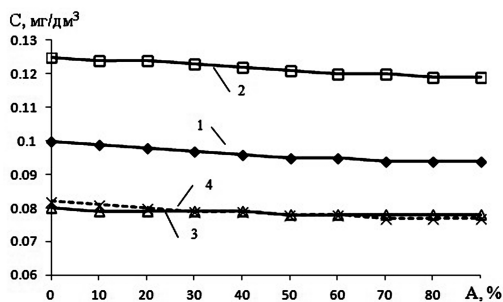


Рис.2. Зависимость концентрации ионов меди (1), кадмия (2), свинца (3, 4) от степени отбора пермиата (A) при фильтрации растворов через мембрану ОПМН-П при рабочем давлении $0,3 \text{ МПа}$ при pH $2,66$ (3); $6,20$ (1, 2, 4) ($СК_1 = 0,154 \text{ мг/дм}^3$; $СК_2 = 0,131 \text{ мг/дм}^3$; $СК_3 = 0,084 \text{ мг/дм}^3$; $СК_4 = 0,091 \text{ мг/дм}^3$).

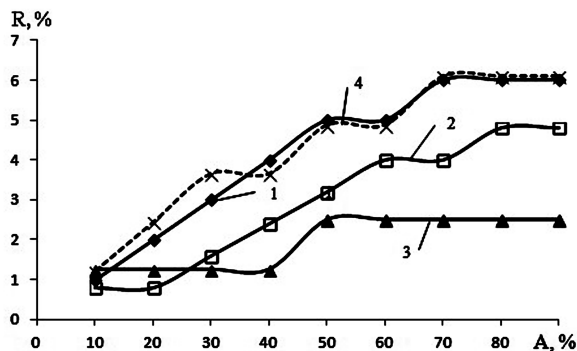


Рис.3. Зависимость селективности мембраны ОПМН-П при очистке растворов сульфатов меди (1), кадмия (2), свинца (3, 4) в дистиллированной воде при исходных концентрациях ионов, мг/дм^3 : Cu – $0,100$ (1), Cd – $0,125$ (2), Pb – $0,080$ (3), $0,082$ (4), при pH $2,63$ (3) и $6,20$ (1, 2, 4).

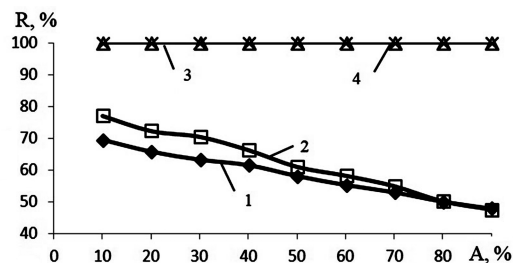


Рис.4. Зависимость селективности мембраны ОПМН-П от степени отбора пермиата (A) при фильтрации раствора ионов меди при исходной концентрации, мг/дм^3 : 1 – $1,059 \cdot 10^{-1}$; 2 – $8,400 \cdot 10^{-2}$; 3 – $1,850 \cdot 10^{-3}$; 4 – $1,000 \cdot 10^{-5}$ – при использовании комплексонов: 1, 2 – Трилона Б ($0,005 \text{ моль/дм}^3$); 3, 4 – ОЭДФК (50 мг/дм^3), при pH $6,27$.

концентрацией $0,005 \text{ моль/дм}^3$ селективность по ионам меди возрастает до $69-77 \%$ на первых стадиях фильтрования и снижается до $47,9-47,5 \%$ при увеличении степени отбора пермиата до 90% (рис.4).

При использовании ОЭДФК концентрацией 50 мг/дм^3 селективность достигает 100% в течение всего периода фильтрования при исходных концентрациях ионов меди $1,85 \cdot 10^{-3}$ и $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$. При этом при концентрации ионов меди $1,85 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$ и степени отбора пермиата 90% медь в фильтрате отсутствовала полностью, а ее содержание в концентрате достигло $1,55 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$ при расчетном количестве $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$. Абсолютная погрешность при этом достигла $0,3 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$, относительная – $16,2 \%$.

При исходной концентрации ионов меди $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$ содержание меди в концентрате было $1,07 \cdot 10^{-4} \text{ мг/дм}^3$ при расчетном значении $1,00 \cdot 10^{-4} \text{ мг/дм}^3$. При этом абсолютная погрешность составила всего $7 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$, а относительная 7% .

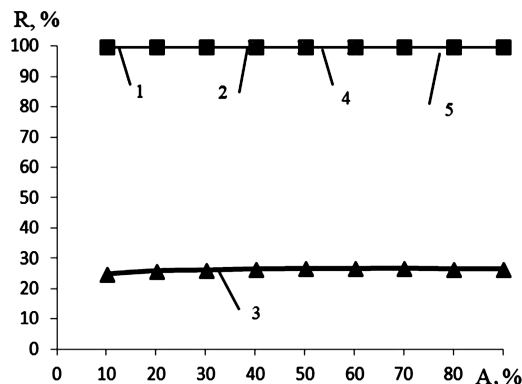


Рис.5. Зависимость селективности мембраны ОПМН-П от степени отбора пермиата при очистке растворов сульфата меди в дистиллированной воде при исходных концентрациях ионов меди, мг/дм^3 : 1 – $1,5 \cdot 10^{-3}$; 2, 3 – $1,16 \cdot 10^{-3}$; 4 – $1,0 \cdot 10^{-5}$; 5 – $1,0 \cdot 10^{-7}$ – при использовании комплексона НТМФК в концентрациях, мг/дм^3 : 3 – 10 ; 2 – 25 ; 1, 4, 5 – 50 , при pH $6,53$.

При использовании в качестве комплексона НТМФК от 10 до 50 мг/дм³ при концентрациях меди 10⁻³–10⁻⁷ мг/дм³ было достигнуто полное выделение меди из воды при концентрациях НТМФК 25–50 мг/дм³. При содержании НТМФК 10 мг/дм³ селективность по меди достигла 26 % (рис.5).

Для концентрации ионов меди 1,5·10⁻³ и 1,16·10⁻³ мг/дм³ содержание ее в концентрате составило 0,0150; 0,0115 и 0,0039 мг/дм³ соответственно (кривые 1–3). При этом значение абсолютной (Δx) и относительной (δ) погрешности составило 0,002 мг и 13 %; 0,0001 мг и 0,9 %. Третье значение измеренной концентрации совпало с расчетным. Для концентрации Cu²⁺ 1,5·10⁻⁵ мг/дм³ — $\Delta x = 1 \cdot 10^{-6}$ мг и $\delta = 0,99$ %, для 1·10⁻⁷ мг/дм³ — $\Delta x = 9 \cdot 10^{-8}$ мг/дм³ и $\delta = 1,0$ %.

Интересные результаты получили при концентрировании меди, растворенной в водопроводной воде (рис.6). В этом случае при концентрации НТМФК достигнуто полное выделение меди при исходных концентрациях 1·10⁻³ и 2,7·10⁻⁸ мг/дм³ при селективности по ионам жесткости 2,38 %. Отмечено снижение жесткости всего с 4,2 до 4,1 мг-экв/дм³. Это говорит о том, что НТМФК образует устойчивые молядерные хелатные структуры с катионами Ca²⁺ и Mg²⁺, которые проходят через нанопольтрационную мембрану. В то же время ионы меди с молекулами НТМФК образуют полядерные комплексы за счет образования между ионами металлов ионных или координационных связей за счет d-орбиталей атомов фосфора и d-электронов металла. Полядерные комплексы достаточно крупные и эффективно задерживаются мембраной, обеспечивая полное выделение ионов меди из воды.

В этом случае при концентрации меди 1·10⁻³ мг/дм³ и степени отбора пермиата 95 %

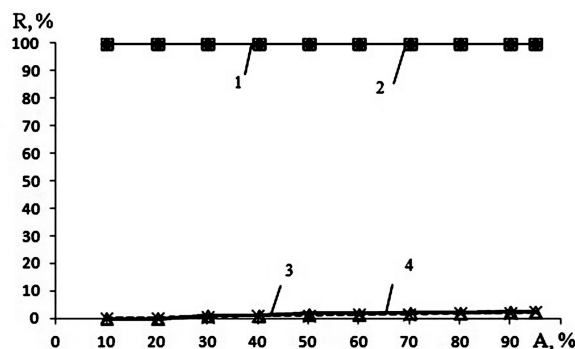


Рис.6. Зависимость селективности мембраны ОПМН-П по ионам меди (1, 2) и ионам жесткости (3, 4) раствора сульфата меди в водопроводной воде (Ж = 4,2 мг-экв/дм³) от степени отбора пермиата при начальной концентрации меди 1,0·10⁻³ мг/дм³ (1, 3) и 2,7·10⁻⁸ мг/дм³ (2, 4) при использовании НТМФК концентрацией 50 мг/дм³ при pH 6,1 (1, 3) и 6,27 (2, 4) (СК₁ = 0,19 мг/дм³; СК₂ = 5,5·10⁻⁷ мг/дм³).

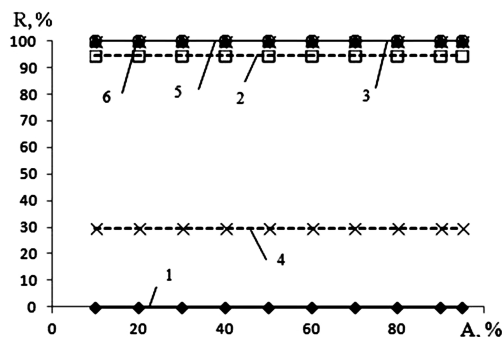


Рис.7. Зависимость селективности мембраны ОПМН-П по ионам кадмия от степени отбора пермиата при очистке раствора сульфата кадмия с концентрацией кадмия, мг/дм³: 1 — 0,125; 2, 3 — 0,100; 4 — 0,010; 5 — 0,015, 6 — 3,8·10⁻⁶, при использовании комплексонов: 1 — НТМФК (50 мг/дм³); 2 — Трилон Б (0,005 г-экв /дм³); 3, 5, 6 — ОЭДФК (50 мг/дм³); 4 — Акватон (50 мг/дм³), ДДТН (20 мг/дм³).

содержание меди в концентрате возросло до 1,9·10⁻² мг/дм³ при расчетном количестве

Таблица 1. Изменение концентрации ионов меди в концентрате C_к (мг/дм³)*

A, %	I	II	III	IV	V	VI	VII
10	1,67·10 ⁻³	1,29·10 ⁻³	3,44·10 ⁻⁴	1,11·10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻⁷	1,11·10 ⁻³	3,00·10 ⁻⁸
20	1,88·10 ⁻³	1,45·10 ⁻³	3,86·10 ⁻⁴	1,25·10 ⁻⁵	1,15·10 ⁻⁷	1,15·10 ⁻³	3,38·10 ⁻⁸
30	2,14·10 ⁻³	1,66·10 ⁻³	4,44·10 ⁻⁴	1,42·10 ⁻⁵	1,42·10 ⁻⁷	1,42·10 ⁻³	3,85·10 ⁻⁸
40	2,50·10 ⁻³	1,93·10 ⁻³	5,17·10 ⁻⁴	1,67·10 ⁻⁵	1,67·10 ⁻⁷	1,67·10 ⁻³	4,51·10 ⁻⁸
50	3,00·10 ⁻³	2,32·10 ⁻³	6,20·10 ⁻⁴	2,00·10 ⁻⁵	2,00·10 ⁻⁷	2,00·10 ⁻³	5,41·10 ⁻⁸
60	3,75·10 ⁻³	2,90·10 ⁻³	7,75·10 ⁻⁴	2,50·10 ⁻⁵	2,51·10 ⁻⁷	2,50·10 ⁻³	6,76·10 ⁻⁸
70	5,00·10 ⁻³	3,87·10 ⁻³	1,03·10 ⁻³	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁷	3,33·10 ⁻³	9,00·10 ⁻⁸
80	7,50·10 ⁻³	5,80·10 ⁻³	1,55·10 ⁻³	5,00·10 ⁻⁵	5,00·10 ⁻⁷	5,01·10 ⁻³	1,35·10 ⁻⁷
90	1,40·10 ⁻²	1,15·10 ⁻³	3,90·10 ⁻³	1,00·10 ⁻⁴	1,00·10 ⁻⁶	1,00·10 ⁻²	2,70·10 ⁻⁷
95	—	—	—	—	2,00·10 ⁻⁶	2,00·10 ⁻²	5,40·10 ⁻⁷

* В зависимости от степени отбора пермиата A при фильтровании растворов сульфата меди концентрацией 10⁻³–10⁻⁸ мг/дм³ в дистиллированной (I–V) и водопроводной (VI, VII) воде при дозах НТМФК 10 (III), 25 (II), 50 (I, IV–VII) мг/дм³ через мембрану ОПМН-П.

Таблица 2. Зависимость эффективности очистки воды от ионов кадмия*

Концентрация комплексонов, мг/дм ³ (г-экв/дм ³)	рН	Концентрация кадмия, мг/дм ³			R, %
		исходная	в пермиате	в концентрате	
НТМФК, 50	6,88	0,125	0,127	0,122/–	0,00
Акватон, 50	6,46	0,01	$7,4 \cdot 10^{-3}$	0,148/0,140	29,7
ДДТН, 20	6,46	0,01	$7,4 \cdot 10^{-3}$	0,148/0,140	29,7
Трилон Б, (0,005)	6,30	0,100	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,044/2,0	94,3
ОЭДФК, 50	6,75	0,100	0,00	1,98/2,0	100,0
ОЭДФК, 50	7,13	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,310/0,300	100,0
ОЭДФК, 50	6,21	$3,8 \cdot 10^{-6}$	0,00	$6,0 \cdot 10^{-5}$ / $5,8 \cdot 10^{-5}$	100,0

* При использовании мембраны ОПМН-П от исходной концентрации ионов кадмия, типа и дозы комплексона, который использовался при степени отбора пермиата 95 %. В числителе – концентрация кадмия измеренная, в знаменателе – рассчитанная.

Таблица 3. Эффективности очистки воды от ионов свинца наночисткой (мембрана ОПМН-П) в зависимости от дозы реагентов и степени отбора концентрата (А)

Реагент	Доза реагента, мг-экв/дм ³	А, %	рН		[Pb ²⁺], мг/дм ³			Pb в осадке, мг		R, %
			начальная	пермиата	исходная	в пермиате	в концентрате	измеренный	рабочий	
Без реагента	–	90	2,66	2,68	0,080	0,078	0,084	–	–	2,75
Без реагента	–	90	6,18	6,10	0,082	0,077	0,091	–	–	6,10
Трилон Б	50	90	9,24	9,22	0,100	0,094	0,150	0,015	0,0154	5,40
CaCl ₂ + Na ₂ CO ₃	20 + 25	100	9,50	7,56	0,100	0,000	–	0,096	0,100	100,0
CaCl ₂ + Na ₂ CO ₃	20 + 25	100	9,20	7,55	$1 \cdot 10^{-5}$	0,000	–	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	100,0
CaCl ₂ + Na ₂ CO ₃	20 + 25	100	9,20	7,63	$1 \cdot 10^{-8}$	0,000	–	$1 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-9}$	100,0

$2,0 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³. В этом случае Δx составило $1,0 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ и $\delta = 5$ %. При концентрации меди $2,7 \cdot 10^{-8}$ мг/дм³ ее содержание в концентрате составило $5,50 \cdot 10^{-7}$ мг/дм³ при $\Delta x = 1 \cdot 10^{-8}$ мг/дм³ и $\delta = 1,9$ %.

Расчетные значения содержания меди в концентрате в зависимости от исходной концентрации в растворе с учетом селективности мембраны приведены в табл.1. Видно, что после фильтрования концентрация меди в концентрате возрастает в 10–20 раз. После упаривания концентрата или при увеличении объема исходного раствора этот показатель можно увеличить еще на 1–2 порядка. Как показали дальнейшие исследования, фосфонатные комплексоны не являются универсальными для других тяжелых металлов. При очистке воды от кадмия, кроме Акватона, ДДТН, Трилона Б, использовали НТМФК и ОЭДФК.

Как видно из рис.7, достаточно высокую селективность обеспечивал Трилон Б (R = 94 %).

Данные об эффективности очистки воды от ионов кадмия приведены в табл.2.

Менее эффективным было использование композиции Акватона и ДДТН и когда нулевую селективность обеспечивала НТМФК. При этом ОЭДФК, наоборот, обеспечивала полное удержание кадмия. Очевидно, что структура молекулы НТМФК обеспечивала образование моноядерных комплексов, хорошо растворимых в

воде, что приводило к снижению селективности мембраны. Структура молекулы ОЭДФК обеспечивала образование полиядерных комплексов, которые хорошо задерживались мембраной при фильтровании раствора.

При концентрации кадмия 0,1 мг/дм³ концентрация его в концентрате достигает 1,98 мг/дм³. При сравнении с расчетным значением (2,00 мг/дм³) $\Delta x = 0,02$ мг/дм³, $\delta = 1$ %. При концентрации кадмия $1,5 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³ – $\Delta x = 0,01$ мг/дм³, $\delta = 3,3$ %, а при концентрации $3,8 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³ – $\Delta x = 2 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³, $\delta = 3,45$ %.

Использование ранее рассмотренных комплексонов было неэффективным при выделении из воды ионов свинца Pb²⁺ при использовании мембраны ОПМН-П. Это обусловлено тем, что ионы свинца не образуют устойчивых комплексов с использованными реагентами. Однако они легко переходят в нерастворимое состояние при сосаждении с карбонатом кальция. Как видно из табл.3, при фильтровании суспензий карбоната кальция совместно с карбонатом свинца он выделяется из воды в большом количестве, что позволяет довольно легко решить проблему его концентрирования.

Выводы

Показано, что наночисточная мембрана ОПМН-П имеет высокую продуктивность и низкую селективность при фильтровании

сильно разбавленных растворов тяжелых металлов. Продуктивность мембраны возрастает от степени отбора пермиата при увеличении рабочего давления от 1,5 до 4 атм.

При использовании комплексонов селективность мембраны возрастает до 100 % даже при использовании очень разбавленных растворов. ОЭДФК и НТМФК обеспечивают выделение меди из воды в пределах концентраций $1-1 \cdot 10^{-8}$ мг/дм³. Ионы кадмия полностью выделяются из воды только при использовании ОЭДФК.

Использованные комплексоны ОЭДФК, НТМФК, Акватон, Трилон Б, ДДТН не влияют на селективность мембраны при выделении ионов свинца Рb²⁺. При сосаждении карбоната свинца с карбонатом кальция ионы свинца выделяются из воды при использовании мембраны ОПМН-П в большом количестве.

Список литературы

1. Трус І.М. Маловідходні технології демінералізації води. Київ : Кондор, 2016. 250 с.
2. Трохименко Г.Г., Циганюк Н.В. Дослідження накопичення важких металів у донних відкладеннях Бузького лиману за допомогою атомно-абсорбційної спектрофотометрії. *Матеріали II Міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 20-річчю незалежності України «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв, 2011. С. 446–448.
3. Шумілова О.О., Трохименко Г.Г. Дослідження впливу евтрофікації на вторинне забруднення Бузького лиману важкими металами // Вісник НУК: електронне видання. № 1, Миколаїв, Видавництво НУК, 2012. С. 56–62.
4. Трохименко Г.Г., Циганюк Н.В. Визначення пріоритетних металів-забрудників у поверхневих во-

- дах р. Інгулець. *Матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми екології та енергозбереження»*. Миколаїв : Вид-во НУК, 2013. С. 267–274.
5. Циганюк Н.В., Трохименко Г.Г. Встановлення вмісту важких металів у донних відкладеннях Бузького лиману за допомогою атомно-абсорбційної спектрофотометрії. *Матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні»*. Миколаїв, 2012. С. 269–271.
 6. Мороз Н.А., Черкашин І.А. Содержание тяжелых металлов и минерализация поверхностных вод региона расположения Запорожской АЭС. *Сб. науч. тр. СИЯЭиП*, 2004. № 10. С. 73–78.
 7. Мороз Н.А., Седнев В.А., Черкашин І.А. Гидрохимический мониторинг поверхностных вод региона расположения Запорожской АЭС. *Пром. теплотехника*. 2005. Т. 27, № 2. С. 78–87.
 8. Суровцев И.В., Галимова В.М., Манк В.М., Копилевич В.А. Определение тяжелых металлов в водных экосистемах методом инверсионной хронопотенциометрии. *Химия и технология воды*. 2009. Т. 31, № 6. С. 677–687.
 9. Иевлева О.С., Бадеха В.П., Гончарук В.В. Влияние высокомолекулярных аминов на извлечение нитратов методом нанофильтрации. *Химия и технология воды*. 2012. Т. 34, № 3. С. 232–243.
 10. Гомеля М.Д., Трус І.М., Грабітченко В.М. Нанофільтраційне опріснення слабо мінералізованих вод. *Вопросы химии и хим. технологии*. 2014. № 1. С. 98–102.
 11. Iurlova L.Yu., Kryvoruchko A.P. Remove of Pb (II) from contaminated water by polymer-supported ultrafiltration. *Adsorption Science and Technology*. 2004. Vol. 22, № 7. P. 543–551.

Поступила в редакцию 27.12.17

Гомеля М.Д., докт. техн. наук, проф., **Іванова В.П.,** аспірант
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ
 просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: m.gomelya@kpi.ua, veronika_m_p@ukr.net

Оцінка ефективності баромембранних методів при очищенні води від іонів важких металів

Вивчено процеси мембранного очищення води від іонів важких металів із сильно розбавлених розчинів. Показано, що продуктивність нанофільтраційної мембрани ОПМН-П при фільтруванні сильно розбавлених розчинів сульфату кадмію в основному залежить від робочого тиску та близька до показників, отриманих при використанні дистильованої води. При виділенні іонів міді, кадмію та свинцю при концентраціях близько 0,1 мг/дм³ селективність мембрани була дуже низькою та не перевищувала 10 %. При використанні комплексонів у деяких випадках селективність мембрани досягала 100 % при зниженні вихідної концентрації іонів металів до 10^{-8} мг/дм³. При цьому іони металів накопичувалися у концентратах в еквівалентних кількостях, що важливо при концентруванні розчинів іонів металів при аналізі надрозбавлених розчинів. *Бібл. 11, рис. 7, табл. 3.*

Ключові слова: нанофільтрація, мембрани, важкі метали, перміат, концентрат, очищення води.

Gomelya N.D., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Ivanova V.P., Graduate Student

Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute, Kiev

37, Peremohy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: m.gomelya@kpi.ua, veronica_m_p@ukr.net

Evaluation of the Effectiveness of Baromembrane Methods of Water Purification from Heavy Metal Ions

Processes of membrane water purification from heavy metal ions in highly diluted solutions were studied. It was shown that the productivity of the nanofiltration membrane OPMN-P in filtering highly diluted cadmium sulfate solutions main depends on the operating pressure and is close to the values obtained when distilled water is used. In the case of separation of copper, cadmium and lead ions at concentrations of $\sim 0.1 \text{ mg/dm}^3$, the membrane selectivity was very low and did not exceed 10 %. In some cases when complexons were used, the selectivity of the membrane was as high as 100 % while the initial concentration of metal ions decreased to 10^{-8} mg/dm^3 . In this case, metal ions accumulated in concentrates in equivalent amounts, which is important for concentrating metal ion solutions in cases where super dilute solutions are analyzed. *Bibl. 11, Fig. 7, Tab. 3.*

Key words: nanofiltration, membranes, heavy metals, permeate, concentrate, water purification.

References

1. Trus I.M. [Low-waste technologies for demineralization of water]. Kiev : Kondor, 2016. 250 p. (Ukr.)
2. Trohymenko G.G., Cyganjuk N.V. [Investigation of the accumulation of heavy metals in the bottom sediments of the Buzh estuary by means of atomic absorption spectrophotometry]. *Materialy II Mizhnarodnoi' naukovo-tehnichnoi' konferencii', prysvozhchenoi' 20-richchju nezalezhnosti Ukraïny «Innovacii' v sudnobuduvanni ta okeanotehnici»*. Mykolayiv, 2011. pp. 446–448. (Ukr.)
3. Shumilova O.O., Trohymenko G.G. [Investigation of the influence of eutrophication on the secondary contamination of the Bug estuary with heavy metals], Visnyk NUK: elektronne vydannja. No. 1, Mykolayiv, Vydavnytstvo NUK, 2012. pp. 56–62. (Ukr.)
4. Trohymenko G.G., Cyganjuk N.V. [Determination of priority metal-pollutants in the surface waters of the river Ingulets]. *Materialy VIII Mizhnarodnoi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' «Problemy ekologii' ta energozberezhennja»*. Mykolayiv : Vydavnytstvo NUK, 2013. pp. 267–274. (Ukr.)
5. Cyganjuk N.V., Trohymenko G.G. [Determination of the content of heavy metals in the bottom sediments of the Buh's estuary through atomic absorption spectrophotometry]. *Materialy VII Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii' «Problemy ekologii' ta energozberezhennja v sudnobuduvanni»*. Mykolayiv, 2012. pp. 269–271. (Ukr.)
6. Moroz N.A., Cherkashyn Y.A. [The content of heavy metals and mineralization of surface waters of the Zaporiz hzhya NPP location region]. *Sbornik nauchnyh trudov SIJaJeiP*. 2004. No. 10. pp. 73–78. (Rus.)
7. Moroz N.A., Sednev V.A., Cherkashin I.A. [Hydrochemical monitoring of surface water in the Zaporozhye NPP location region]. *Promyshlennaya Teplotehnika*. 2005. 27 (2). pp. 78–87. (Rus.)
8. Surovcev I.V., Galimova, V.M. Mank, V.A. Koplevich [Determination of heavy metals in aquatic ecosystems by inversion chronopotentiometry]. *Himija i tehnologija vody*. 2009. 31 (6). pp. 677–687. (Rus.)
9. Ievleva O.S., Badeha V.P., Goncharuk V.V. [Effect of high-molecular amines on the extraction of nitrates by the method of nanofiltration]. *Himija i tehnologija vody*. 2012. 34 (3). pp. 232–243. (Rus.)
10. Gomelja M.D., Trus I.M., Grabitchenko V.M. [Nanofiltration desalination of weakly mineralized waters]. *Voprosy himii i himicheskoi tehnologii*. 2014. No. 1. pp. 98–102. (Ukr.)
11. Iurlova L.Yu., Kryvoruchko A.P. [Remove of Pb (II) from contaminated water by polymer-supported ultrafiltration]. *Adsorption Science and Technology*. 2004. 22 (7). pp. 543–551.

Received December 27, 2017