

УДК [628.161.2:546.19] 621.359.7: 66.081.63

*Л.А. Мельник, Ю.В. Бабак, А.О.Самсоны-Тодоров, В.В. Гончарук*

## **УДАЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЫШЬЯКА В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОГО И ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ**

**Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского НАН Украины, г. Киев**

В работе исследованы процессы мембранного опреснения модельных растворов, содержащих соединения As(V) и As(III). В качестве мембран использовали ионообменные мембраны МК-40 и МА-40 и обратноосмотическую мембрану ESPA-1. Показано, что даже при сравнительно низком содержании As в воде (50–100 мкг/дм<sup>3</sup>) метод электродиализа не позволяет получать диализаты, удовлетворяющие требования к питьевой воде по содержанию этого микроэлемента (10 мкг/дм<sup>3</sup>). Коэффициент задержки As(V) в процессе обратноосмотического опреснения достигает 97,7–99,0% при исходной концентрации мышьяка в растворе 50,0–300,0 мкг/дм<sup>3</sup>, в то время, как аналогичная характеристика для As(III) составляет лишь 75,5%. Таким образом, гарантией высокоэффективной задержки соединений мышьяка в процессе обратного осмоса является полная трансформация As(III) в As(V) в процессе предварительной обработки. Показано, что использование предварительной УФ или УФ/TiO<sub>2</sub> обработки растворов (продолжительность 1–5 мин), содержащих As(III), обеспечивает рост коэффициента задержки мышьяка мембраной ESPA-1 до 94,1–98,0%, а концентрация этого микрокомпонента в пермеате снижается до 0,8–4,8 мкг/дм<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** соединения мышьяка, удаление из воды, электродиализ, обратный осмос.

© Л.А. Мельник, Ю.В. Бабак, А.О.Самсоны-Тодоров, В.В. Гончарук, 2014

### *Введение*

В настоящее время мышьяк рассматривается как наиболее опасное неорганическое загрязнение питьевой воды [1,2]. Опираясь на новейшие данные о канцерогенности и генотоксичности этого микроэлемента при хроническом потреблении даже в микроколичествах с питьевой водой, ВООЗ в 1993 году снизила его предельно-допустимую концентрацию (ПДК) в питьевой воде с 50 до 10 мкг/дм<sup>3</sup>.

В подземных водах около 67–99% от общего количества мышьяка находится в виде арсенитной кислоты, которая практически во всем интервале рН (вплоть до 10) существует в виде недиссоциированных молекул. Это является причиной низкой эффективности удаления мышьяка в традиционных процессах водоочистки (коагуляция, сорбция) [3,4].

В связи с расширением в последние десятилетия практического применения мембранных методов опреснения (электродиализ, обратный осмос) [5,6] для получения питьевой воды из альтернативных источников водоснабжения актуальными являются исследования эффективности указанных методов в плане глубокой очистки воды от мышьяка.

Известно, что удаление арсената в процессе обратнoсмотической обработки с использованием различных типов мембран составляет 88–99%, в то время как удаление арсенита – лишь 5–84% [3,7]. Что касается электродиализной обработки мышьякoсодержащих растворов, то существуют лишь отдельные сведения о возможности извлечения до 80% As (с 21,0 до 3,0 мкг/дм<sup>3</sup>) [8] в процессе электромембранной обработки, однако, при этом ни о глубине опреснения, ни о формах извлекаемого мышьяка информация не приводится.

Цель настоящей работы состояла в исследовании возможностей глубокого извлечения соединений мышьяка при электродиализном и обратнoсмотическом опреснении воды с использованием ионообменных мембран МК-40 и МА-40 и обратнoсмотических мембран ESPA-1, наиболее часто применяемых в Украине для реализации указанных процессов, а также в разработке методов, повышающих эффективность мембранной очистки воды от мышьяка.

### *Методика эксперимента*

Опыты по изучению кинетики удаления As(III, V) из раствора в процессе электродиализного опреснения осуществляли в семикамерном электродиализном аппарате.

Катод 1 А<sub>1</sub> 2 К<sub>1</sub> 3 А<sub>2</sub> 4 К<sub>2</sub> 5 А<sub>3</sub> 6 К<sub>3</sub> 7 Анод,

где 3, 5 – камеры обессоливания, 2,4,6 – камеры концентрирования, 1,7 – электродные каме-

ры. Камеры отделены друг от друга чередующимися мембранами МК-40 (К) и МА-40 (А) производства России в Na- и Cl-формах соответственно. Рабочая площадь одной мембраны 9,8 см<sup>2</sup>, межмембранное расстояние – 5 мм. В качестве катода и анода использовали платину.

В камерах обессоливания 3,5 с линейной скоростью 5 см/с циркулировало 300 см<sup>3</sup> модельного раствора, который содержал 50–110 мкг/дм<sup>3</sup> As (III) или As(V) и 0,1 г-экв/дм<sup>3</sup> NaCl. рН растворов составлял 8,0–8,2. Камеры концентрирования заполняли дистиллированной водой. В электродных камерах 1,7 циркулировал 0,2 М раствор сульфата натрия. Опыты осуществляли в гальваностатическом режиме при плотности электрического тока 0,5 А/дм<sup>2</sup>. В процессе электродиализа из камер обессоливания периодически отбирали раствор, в котором определяли содержание мышьяка и хлорида натрия.

В отдельных опытах по удалению мышьяка(III) использовали модифицированные анионообменные мембраны МА-40, поверхность которых была заранее покрыта оксидом марганца(IV). Анионообменные мембраны размещали в электродиализном аппарате так, что модифицированная поверхность находилась со стороны камер обессоливания 3 и 5.

Для получения модифицированной анионообменной мембраны использован опыт, полученный при исследовании процесса электродиализа марганецoсодержащих растворов [9]. Для этого в камерах обессоливания 3,5 электродиализного аппарата с линейной скоростью 6,3 см/с циркулировало 5 дм<sup>3</sup> раствора, который содержал 0,07 моль/дм<sup>3</sup> хлорида натрия и 0,03 моль/дм<sup>3</sup> сульфата натрия. В камеру концентрирования 4 с линейной скоростью 3,3 см/с подавали 1 дм<sup>3</sup> раствора, который содержал 43,8 г/дм<sup>3</sup> хлорида натрия, 17,8 г/дм<sup>3</sup> сульфата натрия, 55 мг /дм<sup>3</sup> марганца (рН – 6,4). В камеры концентрирования 2,6 подавали 0,2 М раствор хлорида натрия. Электродиализ осуществляли при плотности электрического тока 2,5 А/дм<sup>2</sup> на протяжении 7 и 14 ч, что обеспечивало превышение предельной плотности тока примерно в 3–7 раз. В этих условиях в тонкой примембранной области в камере обессоливания начинает диссоциировать вода и через анионообменную мембрану А<sub>2</sub> возникает поток ОН<sup>-</sup> ионов, которые при выходе из мембраны взаимодействуют с присутствующими в камерах концентрирования 4 ионами Mn(II). В результате этого на отдающей поверхности анионообменной мембраны А<sub>2</sub> образуется малорастворимый Mn(OH)<sub>2</sub>, который окисляется кислородом воздуха до более высокого валентного состояния марганца.

Опыты по обратнoсмотической обработ-

ке модельных растворов выполняли в непроточной («тупиковой») ячейке емкостью 348 см<sup>3</sup>. Площадь мембраны в ней составляла 28,3 см<sup>2</sup>. Ячейка оборудована перемешивающим устройством и расположена над магнитной мешалкой. Скорость оборотов мешалки поддерживали на уровне 300±5 об./мин. Рабочее давление задавали сжатым азотом и контролировали образцовым манометром с точностью 0,1 МПа. Степень отбора пермеата составляла 50–75%.

В исследованиях использовали мембрану полиамидного типа ESPA-1 (США), которую усаживали на протяжении 1 ч при давлении 3,0 МПа с использованием дистиллированной воды.

Модельные растворы содержали 100–300 мкг/дм<sup>3</sup> As и 1 г/дм<sup>3</sup> хлорида натрия. pH растворов составлял 8,0–8,2.

Коэффициент задержки мышьяка (R) обратноосмотической мембраной определяли по формуле:

$$R = (C_{\text{исх.}} - C_{\text{перм.}} / C_{\text{исх.}}) \cdot 100\%,$$

где  $C_{\text{исх.}}$  – концентрация As в исходном растворе;  $C_{\text{перм.}}$  – концентрация As в пермеате.

As(III) дозировался в модельные растворы в виде стандартного раствора As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а As(V) – в виде раствора Na<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>. pH растворов регулировали NaOH. Концентрацию мышьяка в исходных и обработанных пробах воды определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Agilent 7500cs. Натрий определяли атомно-абсорбционным методом.

В отдельных опытах перед обратноосмотической обработкой растворов, содержащих As(III), осуществляли их ультразвуковую (УЗ), УФ (ультрафиолетовую) и УФ/TiO<sub>2</sub> обработку.

УЗ кавитацию модельных растворов осуществляли с использованием установки УЗДН-1 при частоте 22 кГц и мощности 4,0–5,0 Вт/см<sup>2</sup>. Объем раствора, который подлежал обработке, составлял 70 см<sup>3</sup>.

УФ-обработку осуществляли в кварцевом реакторе высотой 470 мм и внутренним диаметром 19 мм [10]. В качестве излучателя использовали кварцевую аргонно-ртутную лампу низкого давления ДРБ-20 с линией излучения 185 нм. Мощность линии излучения с длиной волны 185 нм составляла 1 Вт. Диаметр лампы 17 мм. Толщина слоя воды, подвергающегося УФ-обработке, составляла 1 мм. Объем обрабатываемого раствора – 70 см<sup>3</sup>.

УФ/TiO<sub>2</sub> обработку осуществляли в аналогичном реакторе, где на внутренней поверхности кварцевого кожуха путем предварительной химической и термической обработок был на-

несен фотокатализатор TiO<sub>2</sub>. Толщина слоя катализатора составляла около 100 мкм.

### Результаты и их обсуждение

Кинетика удаления As(III) из раствора при электромембранной обработке представлена на рис. 1, 2.

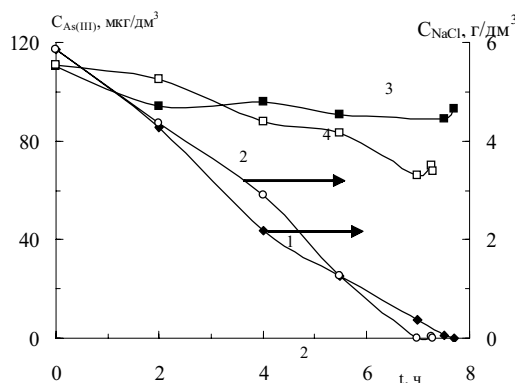


Рис. 1. Кинетика удаления хлорида натрия (кривые 1,2) и As(III) (кривые 3,4) в процессе электродиализного опреснения модельного раствора с использованием немодифицированных (1,3) и модифицированных (2,4) анионитовых мембран

Примечание: Продолжительность модификации каждой из мембран МА-40 – 7 ч; pH опресняемых растворов – 7,9–8,2.

Как видно из рис. 1 (кривые 1, 3), содержание арсенита в растворе в процессе опреснения практически не изменяется, в то время как содержание фонового электролита (хлорида натрия) снижается до 0,1 г/дм<sup>3</sup> и даже ниже. Модификация мембран МА-40 соединениями марганца на протяжении 7 ч повышает степень удаления As(III) из раствора в процессе электродиализного опреснения с 19 до 37%. Это объясняется окислением As(III) соединениями Mn(IV) с образованием хорошо диссоциирующей арсенатной кислоты и дальнейшей электромиграцией арсенат-аниона через анионообменную мембрану.

Увеличение продолжительности модификации анионитовых мембран до 14 ч способствует дальнейшему повышению эффективности удаления соединений As(III), при этом степень их извлечения достигает уже 52–56% (рис. 2).

Катионы Mn(II), образуемые в опресняемом растворе в результате взаимодействия As(III) с малорастворимыми соединениями марганца, удаляются путем электромиграции через катионообменные мембраны и содержание их в опресненной воде не превышает 0,05 мг/дм<sup>3</sup> (ПДК марганца для питьевой воды).

Эффективность извлечения арсената в процессе электромембранного опреснения превы-

шает эффективность извлечения арсенита (рис. 3), тем не менее, степень очистки воды от пятиявалентного мышьяка в процессе электродиализного опреснения не превышает 70% даже при повышении глубины опреснения раствора до 0,10–0,05 г/дм<sup>3</sup>.

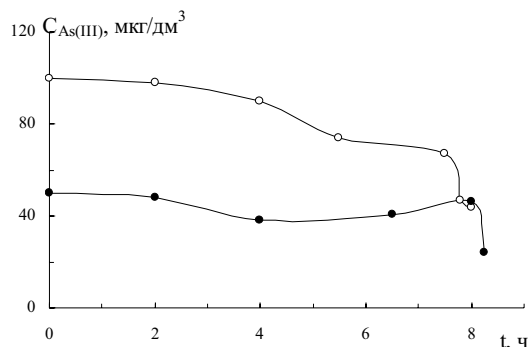


Рис. 2. Кинетика удаления мышьяка в процессе электродиализного опреснения модельных растворов As(III) с использованием модифицированных соединениями марганца анионообменных мембран МА-40

Примечание: Продолжительность модификации каждой из мембран МА-40 – 14 ч; рН опресняемого раствора – 8,2.

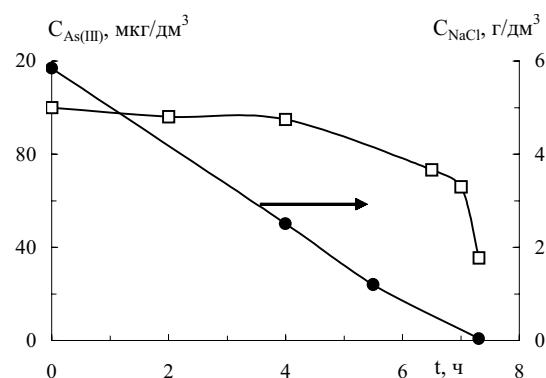


Рис. 3. Кинетика удаления As(V) и хлорида натрия в процессе электродиализного опреснения модельного раствора с использованием мембран МК-40 и МА-40. рН – 8,2

Как видно из рисунка, эффективность удаления арсената резко увеличивается на последних стадиях опреснения раствора, когда его общее солесодержание существенно снижается. Аналогичная закономерность наблюдалась нами также при электродиализном извлечении в щелочной среде микроколичеств бора [11], и она объясняется снижением конкурирующего влияния на электромиграцию микроэлемента других компонентов раствора. Как видно из уравнения 1, выход по току микрокомпонента ( $\bar{t}_1$ ) может достигать ощутимых величин лишь при снижении концентрации макрокомпонента ( $C_2$ )

$$\bar{t}_1 = \frac{\bar{C}_1 \bar{U}_1}{\bar{C}_1 \bar{U}_1 + \bar{C}_2 \bar{U}_2},$$

где  $\bar{C}_1$ ,  $\bar{C}_2$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{U}_2$  – концентрации и подвижности в мембране соответственно микро- и макрокомпонента.

Учитывая то, что предельно-допустимая концентрация мышьяка в питьевой воде составляет лишь 10 мкг/дм<sup>3</sup>, становится очевидным, что ее достижение в процессе электродиализа является проблематичным, поскольку требует практически полного обессоливания раствора.

Результаты исследования задержки As(V) и As(III) в процессе обратнoсмотической обработки модельных растворов представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты обратнoсмотической обработки модельных растворов As(V) и As(III) с использованием мембраны ESPA-1. Р=3,0 МПа, Т=15°С. Степень отбора пермеата – 50%

Модельный раствор	C <sub>As</sub> , в исходном, мкг/дм <sup>3</sup>	C <sub>As</sub> , в пермеате, мкг/дм <sup>3</sup>	R, %
As(V)	50,0	0,6	98,8
	100,0	1,4	98,6
	200,0	4,6	97,7
	300,0	3,0	99,0
As(III)	100,0	24,5	75,5

Как видно из табл. 1, даже при исходной концентрации As(V) в модельном растворе 300,0 мкг/дм<sup>3</sup>, концентрация мышьяка в пермеате составляет лишь 3,0 мкг/дм<sup>3</sup>, что в три раза ниже предельно-допустимой концентрации этого микрокомпонента в питьевой воде. В то же время, коэффициент задержки As(III) мембраной ESPA-1 в аналогичных условиях составляет лишь 75,5 %.

Очевидно, что гарантией высокоэффективной задержки соединений мышьяка в процессе обратного осмоса является полная трансформация As(III) в As(V) в процессе предварительной обработки.

Нами показано, что наличие предварительной кавитационной обработки с использованием ультразвука приводит к заметному росту коэффициента задержки мышьяка: в условиях эксперимента – с 75,5 до 88,7% (табл. 2).

Как отмечается в [12], в процессе кавитационной обработки после схлопывания кавитационных пузырьков в раствор переходят продукты распада молекул воды и продукты рекомбинации радикалов, выявленные методом спиновых ловушек. Это приводит к накоплению в воде молекулярного кислорода, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и других

Таблица 2

Результаты обратноосмотической обработки модельных растворов As(III), прошедших предварительную кавитационную обработку. Мембрана ESPA-1, P=3,0 МПа

Продолжительность УЗ обработки, мин	C <sub>As(III)</sub> , в исходном, мкг/дм <sup>3</sup>	ОВП, мВ	T, °C	C <sub>As</sub> , в пермеате, мкг/дм <sup>3</sup>	R, %
1	100,0	192	43	24,7	75,3
3	100,0	195	62	18,5	81,5
5	100,0	215	75	11,3	88,7

Примечание: ОВП – окислительно-восстановительный потенциал раствора после УЗ обработки, T – температура раствора после УЗ обработки.

Таблица 3

Результаты обратноосмотической обработки модельных растворов As(III), прошедших предварительную УФ и УФ/TiO<sub>2</sub> обработку. Мембрана ESPA-1, P=3,0 МПа, T=15°C

t, мин	УФ+ООс			УФ/TiO <sub>2</sub> +ООс			
	C <sub>As(III)</sub> , в исходном, мкг/дм <sup>3</sup>	C <sub>As</sub> , в пермеате, мкг/дм <sup>3</sup>	R, %	C <sub>As(III)</sub> , в исходном, мкг/дм <sup>3</sup>	C <sub>УФ+TiO<sub>2</sub></sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	C <sub>As</sub> , в пермеате, мкг/дм <sup>3</sup>	R, %
1	–	–	–	100,0	81,2	4,8	94,1
3	–	–	–	100,0	55,7	1,1	98,0
5	100,0	2,9	97,1	100,0	36,0	0,8	97,8
10	100,0	0,7	99,3	100,0	44,5	0,8	98,2
15	100,0	2,7	97,3	–	–	–	–
20	–	–	–	100,0	27,3	0,9	96,7
30	300,0	2,7	99,1	–	–	–	–

Примечание: t – длительность УФ или УФ/TiO<sub>2</sub> обработки; C<sub>УФ+TiO<sub>2</sub></sub> – концентрация мышьяка в растворе после УФ/TiO<sub>2</sub> обработки.

соединений, которые, очевидно, и обеспечивают окисление As(III) до As(V).

Рост ОВП раствора в процессе УЗ обработки (табл. 2) подтверждает это объяснение. Поскольку после УЗ обработки температура раствора повышается (табл. 2), перед проведением обратноосмотических исследований растворов охлаждали до 25°C.

Результаты обратноосмотической обработки мышьяксодержащих растворов, прошедших предварительную УФ и УФ/TiO<sub>2</sub> обработку, приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, применение предварительной УФ и УФ/TiO<sub>2</sub> обработки уже на протяжении 1–5 мин обеспечивает рост коэффициента задержки мышьяка мембраной ESPA-1 с 75,5 до 94,1–98,0%, а концентрация этого микрокомпонента в пермеате снижается до 0,8–2,9 мкг/дм<sup>3</sup>, что значительно ниже предельно-допустимой концентрации мышьяка в питьевой воде.

#### Выводы

Таким образом, наши исследования показали, что даже при сравнительно низком содержании As(V) и As(III) в воде (50–100 мкг/дм<sup>3</sup>) метод электродиализа не позволяет получать диализаты, удовлетворяющие требованиям к питьевой воде по содержанию этого микроэlemen-

та.

Коэффициент задержки As(V) в процессе обратноосмотического опреснения с использованием мембраны ESPA-1 достигает 97,7–99,0% при исходной концентрации мышьяка в растворе 50,0–300,0 мкг/дм<sup>3</sup>, в то время, как аналогичная характеристика для As(III) составляет лишь 75,5%. Следовательно, гарантией высокоэффективного удаления соединений мышьяка из воды в процессе обратного осмоса является полная трансформация As(III) в As(V) в процессе предварительной обработки.

Нами показано, что применение предварительной УФ или УФ/TiO<sub>2</sub> обработки на протяжении 1–5 мин обеспечивает рост коэффициента задержки мышьяка мембраной ESPA-1 до 94,1–98,0%, а концентрация этого микрокомпонента в пермеате составляет 0,8–4,8 мкг/дм<sup>3</sup>, что значительно ниже предельно-допустимой концентрации мышьяка в питьевой воде. Особенно перспективным является использование УФ реакторов с локализованным на их поверхности слоем фотокатализатора TiO<sub>2</sub>, что обеспечивает эффективное окисление As(III) до As(V) на протяжении короткого промежутка времени.

Технологическая схема, включающая УФ/TiO<sub>2</sub>+ООс обработку, может быть успешно



использована для глубокой очистки от мышьяка вод с широким спектром концентраций этого микроэлемента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smedley D.G., Kinniburgh D.G. A review of the source, behaviour, and distribution of arsenic in natural waters // *Applied Geochemistry*. – 2002. – Vol.17. – № 5. – P.517-568.
  2. DeMarco M.J., SenGupta A.K. and Greenleaf J.E. Arsenic removal using a polymeric/inorganic hybrid sorbent // *Water Research*. – 2003. – Vol.37. – № 1. – P.164-176.
  3. Ning Robert Y. Arsenic removal by reverse osmosis // *Desalination*. – 2002. – Vol.143. – № 3. – P.237-241.
  4. Effect of pH on the removal of arsenic and antimony using reverse osmosis membranes / Kang M., Kawasaki M., Tamada S., Kamei T. and Magara Y. // *Desalination*. – 2000. – Vol.131. – P.293-298.
  5. Frenkel Val.S. Seawater Desalination: Trends and Technologies Desalination // *Trends and Technologies*. Edited by Michael Schorr. – ISBN: 978-953-307-311-8. – InTech Europe. – 2011. –P.119-128.
  6. Новые тенденции в разработке современных нанофильтрационных систем для подготовки питьевой воды высокого качества: Обзор / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, Р.В. Ефремов, Ю.В. Козлова // *Критические технологии. Мембраны*. – 2005. – Т.25. – № 1. – С.18-34.
  7. Мельник Л.А., Бабак Ю.В., Гончарук В.В. Соединения мышьяка в природных и питьевых водах: распространение, влияние на здоровье человека, существующие методы очистки // *Химия и технология воды*. – 2012. – Т.34. – № 3. – С.273-282.
  8. Castro de Esparza M.L. Removal of arsenic from drinking water and soil bioremediation. Формат доступа: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/arsenic-water.pdf>.
  9. Liudmyla Melnyk, Vladyslav Goncharuk. Electrodialysis of solutions containing Mn (II) ions // *Desalination*. –2009. – Vol.241. – P.49-56. *Химия и технология воды* – 1988. – Т.10. – № 4. – С.344-347.
  10. Фотоллиз вод с разным изотопным составом // Гончарук В.В., Самсоны-Тодоров А.О., Зуй О.В., Романюкина И.Ю., Яременко В.А. // *Химия и технология воды* – 2014. – Т.36. – № 3. – С.220-228.
  11. Обессоливание борсодержащих растворов с применением гетерогенных мембран МК-40 и МА-40 / А.Т. Пилипенко, В.Д. Гребенюк, Л.А. Мельник, Л.В. Емец // *Химия и технология воды* – 1988. – Т.10. – № 4. – С.344-347.
  12. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // *Вестник ТГТУ*. – 2008. – Т.14. – № 4. – С.861-869.
- Поступила в редакцию 17.11.2014

## ARSENIC COMPOUNDS REMOVAL DURING WATER DESALINATION BY ELECTRODIALYSIS AND REVERSE OSMOSIS

L.A. Melnyk, Yu.V. Babak, A.J. Samsoni-Todorov, V.V. Goncharuk

A.V. Dumanskiy Institute of Colloid and Water Chemistry of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

The membrane desalination processes of the standard test solutions containing As(V) and As(III) compounds are investigated. The ion-exchange membranes MK-40, MA-40 and reverse osmotic membrane ESPA-1 have been used as membranes. It is shown that the method of electrodialysis does not allow receiving the dialysates satisfying the requirements to the content of this trace element (10 µg/L) in potable water even at a rather low As contents in water (from 50 to 100 µg/L). The retention coefficient of As(V) during reverse osmotic desalination reaches 97.7 to 99.0% at an initial concentration of arsenic in solution of 50 to 300 µg/L while the similar characteristic for As(III) reaches only 75.5%. Thus, the full transformation of As(III) to As(V) by pretreatment provides a highly effective removal of arsenic compounds during reverse osmotic treatment. It was shown that the application of preliminary ultraviolet (UV) or UV/TiO<sub>2</sub> treatments of the As(III) containing solutions with a duration of 1 to 5 minutes provides an increase in the retention coefficient of arsenic by membrane ESPA-1 up to 97.1–98.0%, the concentration of this microcomponent in permeate being reduced to 0.8–2.9 µg/L.

**Keywords:** arsenic compounds, removal; water; electrodialysis; reverse osmosis.

## REFERENCES

1. Smedley D.G., Kinniburgh D.G. A review of the source, behaviour, and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, no. 5, pp. 517-568.
2. DeMarco M.J., SenGupta A.K., Greenleaf J.E. Arsenic removal using a polymeric/inorganic hybrid sorbent. *Water Research*, 2003, vol. 37, no. 1, pp. 164-176.
3. Ning Robert Y. Arsenic removal by reverse osmosis. *Desalination*, 2002, vol. 143, no. 3, pp. 237-241.
4. Kang M., Kawasaki M., Tamada S., Kamei T., Magara Y. Effect of pH on the removal of arsenic and antimony using reverse osmosis membranes. *Desalination*, 2000, vol. 131, pp. 293-298.
5. Frenkel V.S., Seawater Desalination: Trends and Technologies Desalination. In *Trends and Technologies*. Ed. M. Schorr., 2011, pp. 119-128. (ISBN: 978-953-307-311-8).
6. Pervov A.G., Andrianov A.P., Efremov R.V., Kozlova Yu.V. Novye tendentsii v razrabotke sovremennykh sistem dlya podgotovki pitjevoi vody vysokogo kachestva. *Obzor*. [The new trends in the development of the up-to date nanofiltration system of the high quality drinking water treatment. A review]. *Kriticheskiye tekhnologii. Membrany*, 2005, vol. 25, no. 1, pp. 18-34. (in Russian).
7. Melnik L.A., Babak Yu.V., Goncharuk V.V. Soedineniya mysh'yaka v prirodnykh i pit'evykh vodach: rasprostraneniye, vliyaniye na zdorov'ye cheloveka, sushchestvuyushiyeh metody ochistki [Arsenic compounds in natural and drinking water: occurrence, effect on human health, and methods of removal]. *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 2012, vol. 34, no. 3, pp. 273-282. (in Russian).
8. Castro de Esparza M.L., Removal of arsenic from drinking water and soil bioremediation. Available at: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/arsenic-water.pdf>.
9. Melnyk L., Goncharuk V. Electrodialysis of solutions containing Mn (II) ions. *Desalination*, 2009, vol. 241, pp. 49-56.
10. Goncharuk V.V., Samsoni-Todorov A.O., Zuy O.V., Romanukina I.Yu., Yaremenko V.A. Fotoliz vod s raznym izotopnym sostavom [Photolysis of water with different isotopic composition]. *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 2014, vol. 36, no. 3, pp. 220-228. (in Russian).

11. Pilipenko A.T., Grebeniuk V.D., Melnik L.A., Emets L.V. Obessolivanie borsoderzhashich rastvorov s ispolzovaniem geterogennykh membran МК-40 i МА-40 [Desalination of boron-containing solutions using heterogeneous membrane МК-40 and МА-40]. *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 1988, vol. 10, no. 4, pp. 344-347. (*in Russian*).

12. Promtov M.A. Perspektivy priminyeniya kavitatsionnykh tekhnologii dlya intensivatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Prospects of the cavitation technology using to intensification of the chemical engineering processes]. *Vestnik TGTU*, 2008, vol.14, no. 4, pp. 861-869. (*in Russian*).