

uids. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, vol. 126, no. 29, pp. 9142-9147.

8. Abbott A.P., Capper G., Davies D.L., McKenzie K.J., Obi S.U. Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 1280-1282.

9. Morrison H.G., Sun C.C., Neervannan S. Characterization of thermal behavior of deep eutectic solvents and their potential as drug solubilization vehicles. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, vol. 378, pp. 136-139.

10. Abbott A.P., Capper G., McKenzie K.J., Ryder K.S. Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid. *Electrochimica Acta*, 2006, vol. 51, no. 21, pp. 4420-4425.

11. Shah D., Mjalli F.S. Effect of water on the thermo-physical properties of Reline: an experimental and molecular simulation based approach. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, vol. 16, no. 43, pp. 23900-23907.

12. Protsenko V.S., Kityk A.A., Shaiderov D.A., Danilov F.I. Effect of water content on physicochemical properties and electrochemical behavior of ionic liquids containing choline chloride, ethylene glycol and hydrated nickel chloride. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, vol. 212, pp. 716-722.

13. AlHazzaa M., AlNashef I., Electrochemical corrosion behavior of steel, copper, and aluminum in selected ionic liquids. *Proceedings of the 7th Saudi Engineering Conference*, KSU, Riyadh, 2007, pp. 193-204.

14. Abbott A.P., Ahmed E.I., Harris R.C., Ryder K.S. Evaluating water miscible deep eutectic solvents (DESS) and ionic liquids as potential lubricants. *Green Chemistry*, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4156-4161.

15. Abbott A.P., Barron J.C., Ryder K.S., Wilson D. Eutectic based ionic liquids with metal containing anions and cations. *Chemistry – A European Journal*, 2007, vol. 13, no. 22, pp. 6495-6501.

УДК [628.161.2:546.19] 66.081.63

Л.О. Мельник

ВПЛИВ ФОНОВОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИДАЛЕННЯ АРСЕНАТУ В ПРОЦЕСІ НАНОФІЛЬТРАЦІЇ

Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, м. Київ

У роботі досліджено вплив фонового електроліту на ефективність затримки арсенату нанофільтраційною мембраною ОПМН-П. Показано що підвищення концентрації хлориду натрію у розчині від 1 до 3 г/дм³ чи заміна хлориду натрію на суміш NaCl та Na₂SO₄ не впливають на процес. Коефіцієнт затримання арсенату помітно знижується в присутності іонів Ca²⁺, що може бути обумовлено взаємодією останніх з функціональними групами мембрани та зменшенням негативних значень її дзета-потенціалу. При зміні фонового електроліту з хлориду натрію на бікарбонат натрію коефіцієнт затримання арсенату зменшується з 97,5 до 92,2–93,1%. Видалення As(V) мембраною ОПМН-П із реальної підземної води гідрокарбонатного типу досягає 93,3–95,7% при ступеню відбору пермеату 90% та концентрації арсену у вихідному розчині 116–220 мкг/дм³. Це забезпечує одержання пермеатів, які відповідають якості питної води за вмістом даного мікрокомпонента. Утилізація сполук арсену із концентратів мембранних установок, об'єм яких можливо мінімізувати завдяки високим коефіцієнтам затримання As(V) мембраною ОПМН-П при відборі пермеату 90%, може бути здійснена методом гідротермальної мінералізації з отримання Ca₅(AsO₄)₃(OH).

Ключові слова: арсенат, видалення, вода, нанофільтрація, фоновий електроліт.

Вступ

В 1993 році ВООЗ, а слідом за нею відповідні агенції в різних країнах світу, враховуючи новітні дослідження щодо токсичності мікрокількостей арсену, знизили гранично – допустиму концентрацію (ГДК) його у питній воді з 50 до 10 мкг/дм³. Це створило серйозні проблеми в багатьох регіонах, які використовують в якості джерела водопостачання підземні води, оскільки призвело до необхідності вдосконалення існуючих систем водопостачання з метою ко-

ригування вмісту арсену в підготовленій для пиття воді.

В зв'язку із цим виникла актуальність досліджень ефективності видалення сполук арсену в процесах нанофільтрації (НФ) та зворотного осмосу (ЗвОс) [1]. В останні десятиліття в усьому світі намітилася тенденція до розширення застосування вказаних методів для вирішення проблем питного водопостачання, що пов'язано з погіршенням якості води в традиційних джерелах водопостачання, встановленням більш

жорстких вимог до якості питної води за окремими показниками, зростанням масштабів використання альтернативних джерел питної води – підземних вод [2].

В роботі [3] нами була показана висока ефективність очищення води від сполук As(V) методом зворотного осмосу з використанням мембрани ESPA-1. Оскільки робочий тиск в процесі нанофільтрації є нижчим, ніж при зворотному осмосі, затрати енергії на НФ є меншими в порівнянні з аналогічною характеристикою процесу ЗвОс приблизно на 21%. Крім того, в процесі НФ досягається більша продуктивність при меншому робочому тиску [4]. В зв'язку із цим дослідження щодо перспектив використання нанофільтраційних мембран для видалення сполук As(V) мають значний практичний інтерес.

В роботі [5] показана висока ефективність затримання As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П в широкому діапазоні рН розчину та робочого тиску при ступені відбору пермеату до 90%. Мембрана ОПМН-П найбільш широко використовується на практиці в порівнянні з іншими мембранами ЗАТ НТЦ Владипор завдяки порівняно низькій вартості, стабільності властивостей, хімічній стійкості, технологічності перероблення в рулонні фільтруючі елементи [6].

Мета даної роботи полягає в дослідженні впливу характерних для природних вод компонентів (сульфатів, бікарбонатів, солей жорсткості) на ефективність видалення сполук As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П. Аналіз спеціальної літератури свідчить про те, що такі дослідження практично не здійснювалися, хоч в окремих роботах повідомляється про погіршення затримання арсену зворотноосмотичними та нанофільтраційними мембранами при переході від індивідуальних арсеновмісних розчинів до реальних природних вод.

Методика експерименту

Дослідження затримання сполук арсену нанофільтраційною мембраною здійснювали з використанням непроточної («тупикової») циліндричної комірки ємністю 348 см³. Робоча площа мембрани в ній складала 28,3 см². Комірка обладнана перемішувачем і розташована над магнітною мішалкою. Швидкість

обертів мішалки підтримували рівною 300±5 об/хв. Робочий тиск задавали стиснутим азотом і контролювали зразковим манометром з точністю ±0,1 МПа. В процесі досліджень в мірний циліндр відбирали проби пермеату для визначення різних показників.

Коефіцієнт затримки (R, %) відповідного компоненту мембраною розраховували за формулою:

$$R = \left(1 - \frac{C_n}{C_0} \right) \cdot 100\% , \quad (1)$$

де C₀ – концентрація компоненту в вихідному розчині; C_n – концентрація компоненту в пермеаті.

Продуктивність мембрани (J, дм³/м²·год) визначали за формулою:

$$J = \frac{V}{S \cdot t} , \quad (2)$$

де V_n – об'єм пермеату, дм³; S – площа мембрани, м²; t – час відбору пермеату, год.

Ступінь відбору пермеату (СВП, %) розраховували за формулою:

$$\text{СВП} = \left(\frac{V_n}{V_p} \right) \cdot 100\% , \quad (3)$$

де V_n – об'єм пермеату, см³; V_p – об'єм розчину, взятого для обробки, см³.

Перед дослідженнями мембрану усаджували при відповідному тиску з використанням дистильованої води.

As(V) дозувався в модельні розчини у вигляді розчину Na₃AsO₄, рН розчинів регулювали NaOH. Концентрацію арсену у вихідних і оброблених пробах води визначали методом мас-спектрометрії з індуктивно-св'язаною плазмою (ICP-MS) на приладі Agilent 7500cs. Вміст солей контролювали солеміром TDS НМ.

Результати та їх обговорення

В табл. 1 наведені результати затримки сполук As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П при обробці модельних розчинів, які

Таблиця 1
Затримання сполук As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П в залежності від концентрації та природи фонового електроліту. Р=1,0 МПа, Т=15–16°С. Модельний розчин містив 90–100 мкг/дм³ As(V), рН=7,0–7,5

СВП, %	NaCl (1 г/дм ³)			NaCl (3 г/дм ³)			NaCl (1 г/дм ³)+Na ₂ SO ₄ (2 г/дм ³)		
	C _n , мкг/дм ³	R _{As} , %	J, дм ³ /м ² ·год	C _n , мкг/дм ³	R _{As} , %	J, дм ³ /м ² ·год	C _n , мкг/дм ³	R _{As} , %	J, дм ³ /м ² ·год
25	–	–	28,5	1,9	98,1	22,6	1,8	98,2	27,0
50	1,8	98,0	27,8	2,0	98,0	22,1	1,8	98,2	25,5
75	1,9	97,9	27,7	2,3	97,7	22,1	2,2	97,8	24,0
90	2,3	97,4	27,1	2,6	97,4	22,0	2,5	97,5	20,9

містили різні концентрації хлорид- та сульфат-іонів. Як видно із таблиці, коефіцієнт затримання As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П при обробленні модельних розчинів складає 97,4–97,5%. Це забезпечує зниження концентрації арсену в пермеаті до рівня, який значно нижчий ГДК цього елементу в питній воді.

Висока селективність нанофільтраційної мембрани ОПМН-П за відношенням до двозарядного арсенат-аніона HAsO_4^{2-} , у вигляді якого As(V) присутній у воді в інтервалі рН 6,7–11,5 [7], як відмічалось в [5], може бути обумовлена, стеричним (великий радіус гідратованого іону) і електростатичним (Доннанівське виключення) факторами.

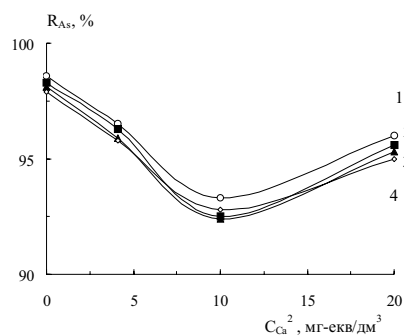
При підвищенні концентрації хлориду натрію у розчині від 1 до 3 г/дм³ чи заміні хлориду натрію на суміш NaCl та Na₂SO₄ ефективність затримання сполук As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П практично не змінюється (табл. 1).

В присутності іонів Ca²⁺ коефіцієнт затримання арсенату помітно знижується (рисунок).

В роботі [8] повідомляється про зменшення негативних значень дзета-потенціалу нанофільтраційної мембрани NF-45 в присутності іонів Ca²⁺, що обумовлено взаємодією останніх з функціональними групами мембрани. Очевидно, при обробленні модельних розчинів, що містять Ca²⁺, відбувається зниження негативного заряду мембрани ОПМН-П, що призводить до погіршення ефективності затримання нею As(V). Таким чином, в процесі оброблення арсенат-вмісних розчинів нанофільтраційною мембраною ОПМН-П виявляється вклад електростатичної складової в механізм затримання арсену.

Як показали подальші дослідження, ефективність мембрани, яка контактувала з Ca²⁺, в плані вилучення As(V) практично відновлюється, якщо її повторно використати для оброблення розчинів хлориду натрію, що не містять кальцію.

В табл. 2 наведені результати двох послідовних дослідів, які були виконані з використанням мембрани, що застосовувалась в серії експериментів, результати яких наведені на рисунку.



Вплив іонів Ca²⁺ на коефіцієнт затримання As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П при ступенях відбору пермеату 25 (1), 50(2), 75(3) та 90% (4). Модельний розчин містив 120 мкг/дм³ As(V), 1 г/дм³ NaCl та різні концентрації CaCl₂. рН=7,5; P=1,0 МПа; T=17–18°C

Як видно із табл. 2, вже при обробленні другої порції розчину, який містить в якості фоновому електроліту лише хлорид натрію, затримання As(V) мембраною ОПМН-П складає 96,8–98,0%, що наближається до початкової характеристики мембрани (97,9–98,6%) за вказаним показником (рисунок).

Результати дослідження впливу бікарбонат-іонів на затримання сполук As(V) нанофільтраційною мембраною ОПМН-П наведені в табл. 3.

Як видно із табл. 3, зміна фоновому електроліту в арсенатвмісному розчині з хлориду натрію на бікарбонат натрію призводить до суттєвого зменшення затримання As(V) мембраною. Причому, вказаний ефект спостерігається вже при порівняно низькій концентрації NaHCO₃ – 0,5 г/дм³. Отриманий результат виявився дещо несподіваним, оскільки, як було показано вище, затримання As(V) мембраною ОПМН-П в присутності 3 г/дм³ NaCl чи суміші NaCl з Na₂SO₄ (табл. 1) залишається практично такою ж, як і в присутності 1 г/дм³ NaCl.

Зменшення ефективності затримання As(V) мембраною ОПМН-П в бікарбонатних розчинах може бути пов'язано із значно кращим затриманням бікарбонату цією мембраною (75–90%) в порівнянні з затриманням хлориду натрію (23,7–48,8%) (табл. 3).

Таблиця 2

Результати нанофільтраційного оброблення модельного розчину, який містив 120 мкг/дм³ As(V) та 1 г/дм³ NaCl (рН=7,4) мембраною ОПМН-П, що попередньо використовувалась для оброблення розчинів з вмістом Ca²⁺ 4,5–20 мг-екв/дм³ (рис. 1). P=1,0 МПа. T=17,0–18,0°C

СВП, %	Дослід 1 (V=100 см ³)				Дослід 2 (V=200 см ³)			
	С _п , мкг/дм ³	R _{As} , %	R _{солей} , %	J, дм ³ /м ² ·год	С _п , мкг/дм ³	R _{As} , %	R _{солей} , %	J, дм ³ /м ² ·год
25	7,4	93,8	49,1	71,7	2,4	98,0	46,2	78,7
50	8,1	93,3	41,6	72,2	3,1	97,4	40,1	78,5
75	8,5	92,9	33,4	73,8	3,4	97,2	31,7	79,3
90	9,2	92,3	24,6	73,4	3,9	96,8	23,9	79,3

Результати оброблення модельних арсенатвмісних розчинів з використанням мембрани ОПМН-П.

 $C_{As(V)}=115$ мкг/дм³; рН = 8,25–8,30; Р=1,0 МПа; Т=17,0–18,0°С

Фоновий електроліт	СВП, %	C_p , мкг/дм ³	R_{As} , %	$R_{соли}$, %	J, дм ³ /м ² ·год
1 г/дм ³ NaCl	25	1,9	98,3	48,8	81,3
	50	2,2	98,1	41,5	79,7
	75	2,5	97,8	32,8	77,8
	90	2,9	97,5	23,7	76,5
0,5 г/дм ³ NaHCO ₃	25	2,8	97,6	90,0	78,5
	50	3,3	97,1	87,6	76,9
	75	6,8	94,0	82,8	75,9
	90	8,9	92,2	74,7	74,1
1,0 г/дм ³ NaHCO ₃	25	5,6	95,1	85,9	75,7
	50	7,3	93,7	84,9	73,1
	75	8,6	92,5	81,3	72,1
	90	7,9	93,1	75,6	69,8

Як відмічається в роботах [8,9], при обробленні багатокомпонентного розчину затримання певного іона покращується в присутності іона, що характеризується більш високою проникністю через мембрану і має однаковий з досліджуваним іоном знак заряду. Даний висновок витікає із аналізу рівнянь для розрахунку селективності мембрани за окремими іонами при обробленні багатокомпонентних неконцентрованих розчинів суміші сильних електролітів, одержаних методом, який базується на врахуванні зміни міжфазного потенціалу при переході від бінарного розчину до багатокомпонентного [9].

В дослідженні [8] показано, що затримання As(V) нанофільтраційною мембраною NF-45 суттєво покращується при обробленні розчинів, які містять 0,01 моль/дм³ NaCl та 0,001 моль/дм³ NaHCO₃ (бікарбонат використовувався з метою створення рН, характерного для природних вод – 8,1–8,2), у порівнянні з обробленням розчинів, які містять в якості фонового електроліту лише 0,001 моль/дм³ NaHCO₃. Зокрема, при концентрації As(V) в розчині 100 мкг/дм³ коефіцієнт затримання арсену в процесі оброблення хлоридовмісних розчинів складає 90%, в той час, як при обробленні вільних від хлориду розчинів – лише 85%. При зменшенні концентрації арсену в розчині вказані показники відрізняються більшою мірою, складаючи 65 та 45% відповідно при концентрації As(V) 10 мкг/дм³.

Таким чином, виявлене в даній роботі зменшення ефективності видалення As(V) мембраною ОПМН-П при обробленні модельних розчинів, що містять бікарбонат-іони (табл. 3), обумовлене, скоріш за все, не негативним впливом бікарбонату на вказаний процес, а відсутністю його позитивного впливу на затримання арсенату, як це має місце в процесі оброблення модельних розчинів, що містять хлорид.

Оскільки при дослідженні сульфатовмісних

модельних розчинів до складу останніх входив хлорид (табл. 1), зниження коефіцієнта затримання As(V) у цьому випадку не спостерігалось, не дивлячись на те, що затримання сульфат-аніона мембраною ОПМН-П є вищою, ніж затримання бікарбонату.

Результати нанофільтраційного оброблення з використанням мембрани ОПМН-П підземної води, хімічні показники якої подані в табл. 4, наведені в табл. 5. Сполуки As(V) дозувалися у реальну воду у вигляді розчину Na₃AsO₄.

Таблиця 4

Хімічні показники реальної підземної води (бювет м. Київ, вул. Ірпінська, 76)

Показник	Значення
рН	7,2
Жорсткість, мг-екв/дм ³	4,5
Лужність, мг-екв/дм ³	6,0
Бікарбонати, мг/дм ³	366
Хлориди, мг/дм ³	10,0
Натрій, мг/дм ³	10,0
Калій, мг/дм ³	6,6
Фториди, мг/дм ³	0,2
Нітрати, мг/дм ³	0,6
Ферум, мг/дм ³	0,06
Каламутність, мг/дм ³	<0,3
Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³	0,1

Як видно із табл. 5, коефіцієнт затримання As(V) мембраною ОПМН-П при обробленні реальної підземної води складає 93,3 та 95,7% при ступені відбору пермеату 90% та концентрації арсену у вихідному розчині відповідно 116 та 220 мкг/дм³. Це забезпечує одержання пермеатів, які відповідають якості питної води за вмістом даного компонента. Збільшення концентрації арсену у воді призводить до покращення його затримання.

Затримання As(V) мембраною ОПМН-П в процесі обробки реальної води (бювет м. Києва, вул. Ірпінська, 76). Р=1,0 МПа. Т=16,0–17,0°C

Ступінь відбору пермеату, %	Концентрація As(V) в вихідній воді, мкг/дм ³							
	116,0				220,0			
	C _п , мкг/дм ³	R _{As} , %	R _{солей} , %	J, дм ³ /м ² ·год	C _п , мкг/дм ³	R _{As} , %	R _{солей} , %	J, дм ³ /м ² ·год
25	4,9	95,8	85,6	84,3	4,1	98,1	85,4	75,7
50	6,5	94,4	84,3	82,4	6,9	96,9	83,8	74,2
75	7,0	94,0	81,9	79,8	8,4	96,2	81,7	74,1
90	7,7	93,3	79,7	77,8	9,4	95,7	79,3	72,9

Висновки

Таким чином, результати здійснених досліджень демонструють високу ефективність нанофільтраційної мембрани ОПМН-П в процесі затримання As(V) при обробленні модельних розчинів різного складу, а також реальних природних вод.

Утилізація сполук арсену із концентратів мембранних установок, об'єм яких можливо мінімізувати завдяки високим коефіцієнтам затримання As(V) мембраною ОПМН-П при відборі пермеату 90%, може бути здійснена методом гідротермальної мінералізації з отримання джонбауміту (Ca₃(AsO₄)₃(OH)) [10]. Даний мінерал має високий вміст арсену і може бути використаний в якості сировини для виробництва різних сполук цього елемента.

нанофільтраційних мембран / А.И. Бон, В.Г. Дзюбенко, В.П. Дубяга, А.А. Поворов // Наука Кубани. – 2000. – № 5 (Ч. 2). – С.140-141.

7. Таланов В.М., Житный Г.М. Ионные равновесия в водных растворах. – М.: Академия естествознания, 2007. – 95 с.

8. Vrijenhoek E.M., Waypa J.J. Arsenic removal from drinking water by a “loose” nanofiltration membrane // Desalination. – 2000. – 130. – P.265-277.

9. Кочаров Р.Г. Теоретические основы обратного осмоса. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. – 143 с.

10. Itakura T., Sasai R., Itoh H. Arsenic recovery from water containing arsenite and arsenate ions by hydrothermal mineralization // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol.146. – № 1-2. – P.328-333.

Надійшла до редакції 2.06.2016

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.

2. 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 // Серия. Критические технологии. Мембраны. – 2005. – Т.25. – № 1. – С.18-34.

3. Удаление соединений мышьяка в процессах электродиализного и обратноосмотического опреснения воды / Л.А. Мельник, Ю.В. Бабак, О.О.Самсоны-Тодоров, В.В. Гончарук // Вопр. химии и хим. технологии. – 2014. – Т.5-6 (98). – С.76-82.

4. Saitua H., Gil R., Padilla A.P. Experimental investigation on arsenic removal with a nanofiltration pilot plant from naturally contaminated groundwater // Desalination. – 2011. – 274. – P.1-6.

5. Мельник Л.О., Бабак Ю.В. Видалення As(V) із води методом нанофільтрації з використанням мембрани ОПМН-П // Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – С.140-143.

6. Разработка и исследование свойств композитных

INFLUENCE OF SUPPORTING ELECTROLYTE ON ARSENATE REMOVAL EFFICIENCY IN THE PROCESS OF NANOFILTRATION

L.O. Melnyk

A.V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The influence of the supporting electrolyte on the efficiency of arsenate retention by nanofiltration membrane OPMN-P is investigated in the paper. It is shown that the increase of sodium chloride concentration in the solution from 1 up to 3 g/L or the replacement of sodium chloride by a mixture of NaCl and Na₂SO₄ has no effect on the process. The coefficient of arsenate retention considerably diminishes in the presence of Ca²⁺ ions that can be caused by its interaction with the functional groups of a membrane and a decrease of negative value of its zeta potential. After the replacement of sodium chloride as a supporting electrolyte by sodium bicarbonate, the arsenate retention coefficient decreases from 97.5 to 92.2-93.1%. The removal of As(V) from real underground water of bicarbonate type reaches 93.3-95.7% at permeate recovery of 90% and arsenic concentration in the initial solution of 116 to 220 mg/L. This provides obtaining permeates that meet the standards of drinking water quality with regard to the contents of the microcomponent under consideration. The utilization of arsenic compounds from concentrates of membranous installations can be performed by the hydrothermal mineralization method which provides obtaining Ca₃(AsO₄)₃(OH). The volume of membranous installations may be minimized owing to high As(V) retention coefficient by OPMN-P membrane at permeate recovery of 90%.

Keywords: arsenate; removal; water; nanofiltration; supporting electrolyte.

REFERENCES

1. Melnik L.A., Babak Yu.V., Goncharuk V.V. Soedineniya mysh'yaka v prirodnykh i pit'evykh vodakh: rasprostraneniye, vliyaniye na zdorov'ye cheloveka, sushchestvuyushchiye 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).
2. Pervov A.G., Andrianov A.P., Efremov R.V., Kozlova Yu.V. Novye tendentsii v razrabotke sovremennykh sistem dlya podgotovki pit'yevoi 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).
3. Melnik L.A., Babak Yu.V., Samsoni-Todorov A.O., Goncharuk V.V. Udalenie soedinenii mysh'yaka v protsessakh elektrodializnogo i obratnoosmoticheskogo opresneniya vody [Arsenic compounds removal during water desalination using electrodialysis and reverse osmosis]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2014, vol. 5-6, pp. 76-82. (in Russian).
4. Saitua H., Gil R., Padilla A.P. Experimental investigation on arsenic removal with a nanofiltration pilot plant from naturally contaminated groundwater. *Desalination*, 2011, vol. 274, pp. 1-6.
5. Melnik L.A., Babak Yu.V., Vydalenn'ya As(V) iz vody metodom nanofiltratsii z vykorystanyam membrany OPMN-P [Removal of As(V) from water by nanofiltration method using OPMN-P membrane]. *Proceedings of the III International Scientific and Technological Conference «Pure water: Fundamental, applied and industrial aspects»*. Ukraine, Kyiv, 2015, pp. 140-143. (in Ukrainian).
6. Bon A.I., Dzyubenko V.G., Dubyaga V.P., Povorov A.A. Razrabotka i issledovanie svoistv kompozitnykh nanofiltratsionnykh membran [Development and research of properties of composite nanofiltration membranes]. *Nauka Kubani*, 2000, no. 5 (part 2), pp. 140-141. (in Russian).
7. Talanov B.M., Zhitnyi G.M., *Ionnye ravnovesiya v vodnykh rastvorakh* [Ionic equilibrium in aqueous solutions]. Akademiya Estestvoznaniya Publishers, Moscow, 2007. 95 p. (in Russian).
8. Vrijenhoek E.M., Waypa J.J. Arsenic removal from drinking water by a «loose» nanofiltration membrane. *Desalination*, 2000, vol. 130, pp. 265-277.
9. Kocharov R.G., *Teoreticheskie osnovy obratnogo osmosa* [Fundamentals of the reverse osmosis]. RKhTU imeni Mendeleeva Publishers, Moscow, 2007. 143 p. (in Russian).
10. Itakura T., Sasai R., Itoh H. Arsenic recovery from water containing arsenite and arsenate ions by hydrothermal mineralization. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 146, pp. 328-333.