

ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 628.161.2:546.71

ГОМЕЛЯ М. Д., ТРУС І. М.*, ВАКУЛЕНКО А. К., ТАРАНЕНКО А. С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФАТІВ З ВОДИ НА ЗВОРТНЬООСМОТИЧНИХ ФІЛЬТРАХ

В роботі досліджено процеси очищення дистильованої та артезіанської води від о-фосфатів на зворотньоосмотичній мембрані низького тиску Filmtec TW30-1812-50. Було визначено залежності продуктивності та селективності мембрани від концентрації фосфатів та ступеню відбору перміату. Було встановлено, що залишкові концентрації фосфатів у перміаті зростають із збільшенням ступеню відбору перміату. Найнижчі залишкові концентрації фосфатів були за вихідної концентрації до 10 мг/дм^3 . Найвищі – при вихідній концентрації $> 900 \text{ мг/дм}^3$. При цьому продуктивність мембрани постійно знижувалась як при підвищенні вихідної концентрації, так і при зростанні ступеню відбору перміату, що обумовлено зростанням осмотичного тиску на мембрані. Селективність мембрани була найвищою при вихідній концентрації до 10 мг/дм^3 і дещо знижувалась при ступені відбору перміату 20 – 50 % при вихідних концентраціях фосфатів $100 – 900 \text{ мг/дм}^3$. При максимальному ступені відбору перміату – 90 % селективність мембрани сягала 97 – 99 % і знижувалась по мірі зростання концентрації фосфатів, що обумовлено зміною рН середовища, гідролізом фосфатів, гідратацією іонів та концентраційною поляризацією. Дещо нижчою була селективність мембрани по фосфатах у розчинах в артезіанській воді (95 – 99 %), що обумовлено конкуруючим впливом хлоридів, сульфатів та гідрокарбонатів, зниженням рН розчину до 7,52 – 7,67, що сприяє гідролізу о-фосфатів.

Ключові слова: фосфати, мембранна, зворотній осмос, продуктивність, селективність, перміат, концентрат.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2023.283525

*Corresponding author: inna.trus.m@gmail.com

Received 11 April 2023; Accepted 08 June 2023

Постановка проблеми. В останні десятиріччя в стічних водах, що надходять на очищення, концентрації сполук азоту та фосфору різко зросли. Якщо, в середині 90-х років минулого століття вони становили $15\text{--}20 \text{ мг/дм}^3$ (по азоту амонійному) та $6\text{--}8 \text{ мг/дм}^3$ (по фосфатах), то на сьогоднішній день вказані показники сягають 50 та 30 мг/дм^3 , відповідно. Підвищення вмісту фосфатів у воді призводить до евтрофікації, яка має негативний вплив на людей, тварин і рослин. Фосфати можуть надходити у водні джерела різними шляхами внаслідок природних процесів та антропогенної діяльності, проте найбільш поширеними є: надходження з неочищеними чи недостатньо очищеними стічними водами та внаслідок стоку із сільськогосподарських угідь при розчиненні фосфорних добрив у дощовій воді та, як наслідок, скидання фосфатів у річки та інші поверхні та підземні водні ресурси.

Аналіз попередніх досліджень. Одним з найпоширеніших способів дефосфатування води є реагентний метод, котрий базується на використанні солей заліза, алюмінію та кальцію. Даний спосіб є досить простим та дозволяє досягти необхідних показників в очищеній воді, проте його широке впровадження обмежене внаслідок використання високовартісних реагентів та необхідності влаштування реагентного господарства, до того ж досить часто не вдається уникнути вторинного забруднення води. Для здешевлення процесу використовують різноманітні відходи в якості коагулянтів [1]. Також досліджуються «зелені» коагулянти на основі природної сировини [2]. Також ведуться дослідження електрокоагуляційного очищення води [3].

Для уникнення даних недоліків реагентні методи доцільно поєднувати з біологічним очищенням води, що засноване на використанні мікроорганізмів активного мулу. Проте біологічні методи мають ряд недоліків: неможливість отримання стабільних та збіжних результатів, неможливість досягти необхідного

ступеня очищення води, висока чутливість до ряду факторів, довготривалість і складність процесу та необхідність значних площ [4].

Методи адсорбції є досить дешевими у застосуванні, проте не завжди дозволяють досягти необхідного ступеня очищення води від фосфатів та утворюються значні об'єми відходів, які складно утилізувати [5].

Вищеназвані методи направлені на зв'язування фосфатів у водонерозчинні органічні та неорганічні сполуки. Проте це не дає можливості вилучати та переробляти фосфати в корисні продукти. Іонний обмін [6] та баромембранні процеси [7] дозволяють концентрувати фосфати та використовувати їх повторно.

Численні літературні дані свідчать про ефективність баромембранного очищення води від фосфатів. Для підбору оптимальних параметрів процесу дефосфатування важливим є визначення меж мембранного очищення води від поліютантів до норм ГДК. Проте в роботах недостатньо вивчено вплив ступеню відбору перміату на ефективність затримання фосфатів на мембрані та вплив вихідної концентрації на вміст фосфатів у перміаті.

Метою роботи було вивчення процесів зворотньоосмотичного вилучення фосфатів на мембрані низького тиску з дистильованої та з артезіанської води, вивчення впливу вихідних концентрацій фосфатів та ступеню відбору перміату на продуктивність та селективність мембрани Filmtec TW30-1812-50.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити наступні завдання:

- визначити залежність продуктивності та селективності по фосфатах зворотньоосмотичної мембрани низького тиску в залежності від ступеню відбору перміату та концентрації фосфатів;
- дослідити можливість вилучення фосфатів з артезіанської води з одночасним її пом'якшенням та очищенням від інших аніонів (сульфатів, хлоридів і нітратів) на мембрані низького тиску Filmtec TW30-1812-50.

Методика роботи. Для проведення досліджень по вилученню фосфатів з води використовували касету із зворотньоосмотичною мембраною низького тиску Filmtec TW30-1812-50.

Як середовище використовували розчини ортофосфату натрію з концентрацією фосфатів в дистильованій ($C(\text{PO}_4^{3-}) = 1,1 \text{ мг/дм}^3$; $10,0 \text{ мг/дм}^3$; $100,0 \text{ мг/дм}^3$; $900,0 \text{ мг/дм}^3$) та артезіанській воді ($J = 7,7 \text{ мг-екв/дм}^3$; $C(\text{Ca}^{2+}) = 6,1 \text{ мг-екв/дм}^3$; $C(\text{Mg}^{2+}) = 1,6 \text{ мг-екв/дм}^3$; $L = 7,7 \text{ мг-екв/дм}^3$; $C(\text{SO}_4^{2-}) = 21,3 \text{ мг/дм}^3$; $C(\text{Cl}^-) = 30,7 \text{ мг/дм}^3$; $C(\text{PO}_4^{3-}) = 23,1 \text{ мг/дм}^3$; $\text{pH} = 7,50$).

Дані розчини подавали насосом на зворотньоосмотичний фільтр. Відбирали проби перміату по $1,0 \text{ дм}^3$, а концентрат повертали у робочий розчин. Вихідні об'єми розчинів $10,0 \text{ дм}^3$. Тиск у системі підтримували на рівні 4 атм, регулюючи подачу води насосом та витрату концентрату краном. При фільтруванні розчину, приготовленому на дистильованій воді, у кожній пробі перміату та концентрату визначали концентрацію фосфатів та pH середовища. У випадку використання артезіанської води крім концентрації фосфатів та pH визначали жорсткість, вміст кальцію і магнію, лужність води, сульфатів і хлоридів. Крім того, для концентрату всі показники, окрім pH, розраховували теоретично.

Вміст фосфатів, сульфатів, хлоридів, жорсткості, кальцію, магнію, лужності, pH середовища визначали за стандартними методиками.

Для розрахунку селективності мембрани (R , %) використовували формулу:

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

де R – селективність мембрани, %; C_0 та C_n – концентрація фосфатів у вихідному розчині та перміаті, відповідно.

Для розрахунку концентрації фосфатів в i -й пробі концентрату (C_{ki} , мг/дм³) використовували формулу:

$$C_{ki} = \frac{V_0 \cdot C_0 - \sum_{i=1}^n (C_{ni} \cdot V_{ni})}{V_0 - \sum_{i=1}^n V_{ni}}, \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3} \quad (2)$$

де C_{ki} – концентрація фосфатів у концентраті після відбору i -ї проби перміату, мг/дм³; C_0 та V_0 – концентрація фосфатів у вихідному розчині (мг/дм³) та об'єм вихідного розчину (дм³), відповідно; V_{ni} – об'єм проби перміату, л дм³; C_{ni} – концентрація фосфатів в i -й пробі перміату, мг/дм³; i – число проб перміату, $n=1-9$.

Для розрахунку продуктивності мембрани (швидкості трансмембранного потоку) (j , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) використовували формулу:

$$j = \frac{V_n}{S \cdot \Delta\tau} \cdot \frac{\text{дм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}, \quad (3)$$

де j – продуктивність мембрани, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; V_n – об’єм проби перміату, 1 дм^3 ; S – площа мембрани, м^2 ; $\Delta\tau$ – час відбору проби, год.

Виклад основного матеріалу. Результати по очищенню води від фосфатів на зворотньоосмотичній мембрані низького тиску приведені на рис. 1 - 3.

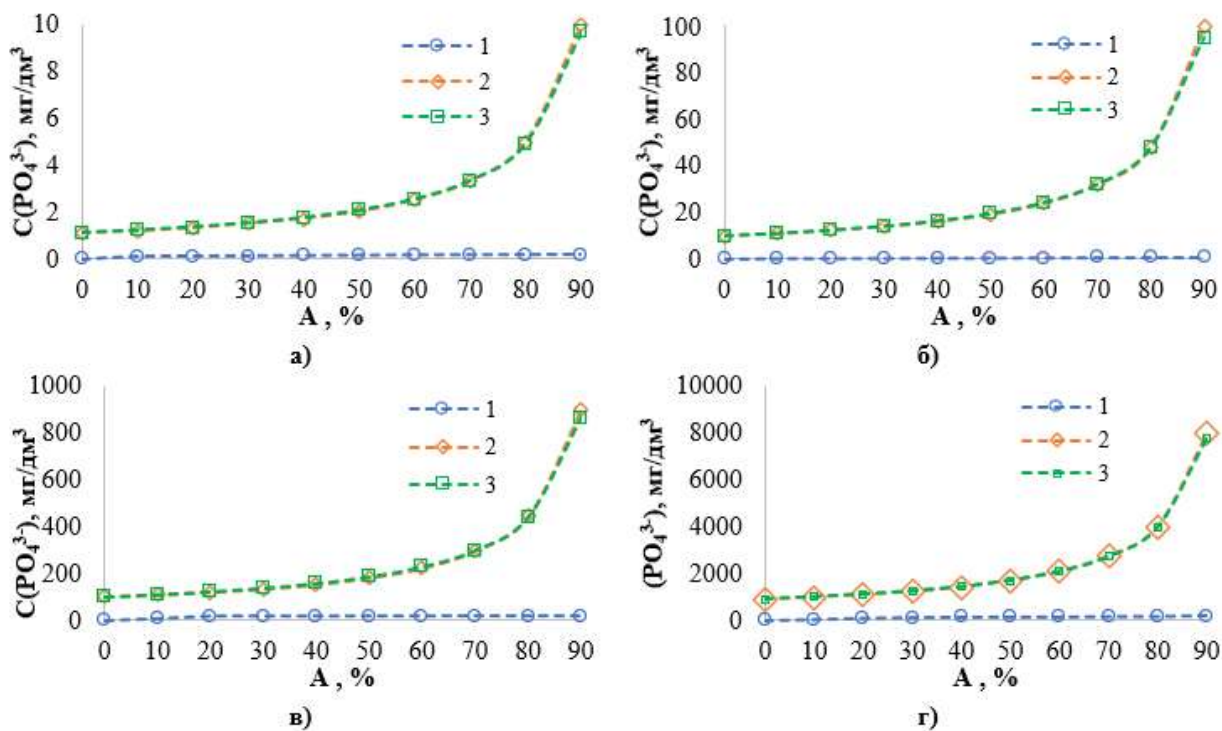


Рис. 1 – Залежність концентрації фосфатів у перміаті (1), концентраті (2; 3) (реальна (2) і розрахована (3)) від ступеню відбору перміату (A , %) при робочому тиску 4,0 атм. при фільтруванні розчину Na_3PO_4 з різною початковою концентрацією: а) $C_{\text{вих}}(\text{Na}_3\text{PO}_4) = 1,1 \text{ мг/дм}^3$; б) $C_{\text{вих}}(\text{Na}_3\text{PO}_4) = 10,0 \text{ мг/дм}^3$; в) $C_{\text{вих}}(\text{Na}_3\text{PO}_4) = 100,0 \text{ мг/дм}^3$; г) $C_{\text{вих}}(\text{Na}_3\text{PO}_4) = 900,0 \text{ мг/дм}^3$

І ще більше зростає концентрація фосфатів у перміаті при підвищенні вихідної їх концентрації у модельному розчині до $\sim 900 \text{ мг/дм}^3$. В даному випадку вміст фосфатів у перміаті сягає $40\text{--}200 \text{ мг/дм}^3$. Якщо врахувати, що при концентрації фосфатів до 10 мг/дм^3 рН розчину не перевищує 7,147, то при концентраціях фосфатів $100\text{--}900 \text{ мг/дм}^3$ рН = 9,659 – 10,390. Очевидно, що таке зростання рН суттєво впливає на гідратацію фосфат аніонів у воді і відповідно на їх здатність затримуватись мембраною. При підвищенні рН за рахунок гідролізу ортофосфату натрію погіршуються умови гідратації частково гідролізованих фосфат аніонів. За нейтральних значень рН середовище фосфат аніони найбільш гідратовані, і тому добре затримуються мембраною.

Із підвищенням рН даний ефект послаблюється, що призводить до зниження ефективності очищення води від фосфатів. Крім того не слід недооцінювати концентраційний фактор, який призводить до збільшення впливу концентраційної поляризації на ефективність видалення фосфатів.

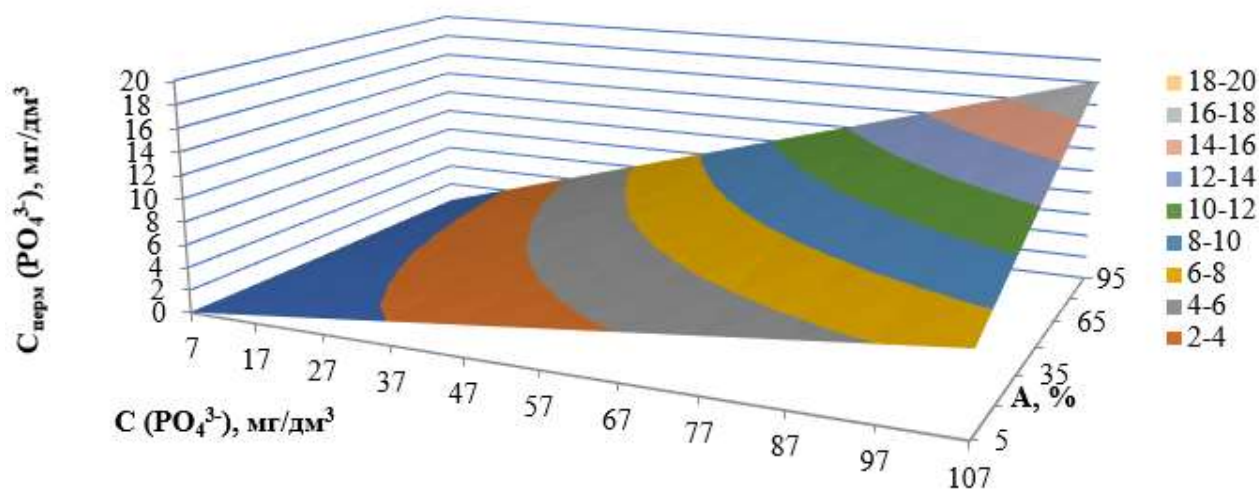


Рис. 2 – Залежність концентрації фосфатів у перміаті від вихідної концентрації Na_3PO_4 та ступеню відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

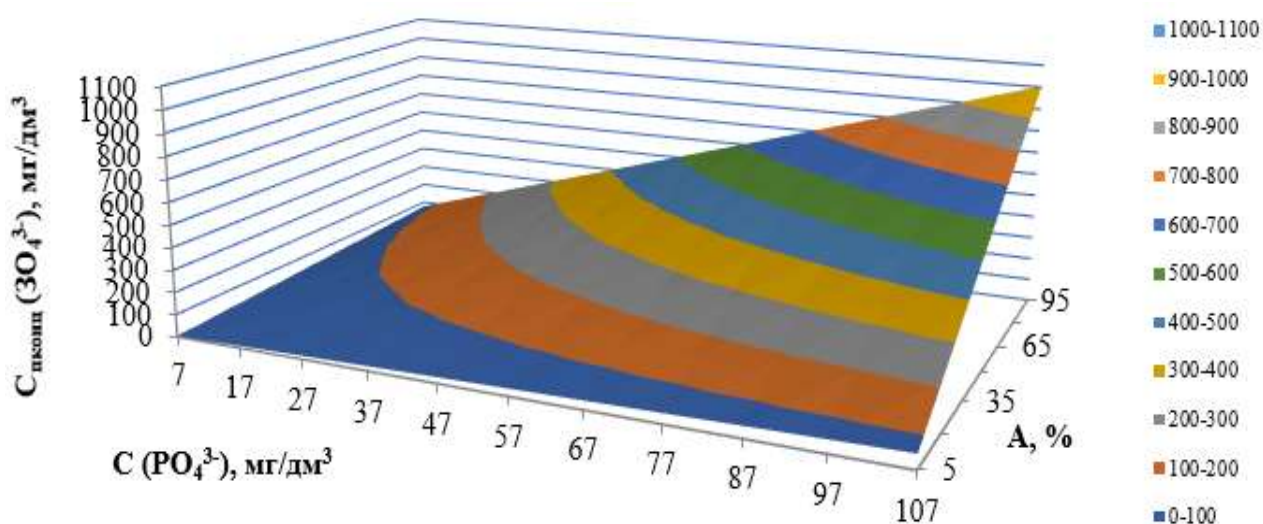


Рис. 3 – Залежність концентрації фосфатів у концентраті від вихідної концентрації Na_3PO_4 та ступеню відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

Якщо оцінювати вплив рН на процес зворотньоосмотичного вилучення фосфатів із води, то слід звернути увагу на наступне. При концентрації фосфатів у воді до 10 mg/dm^3 спостерігалось зниження рН у перміаті та підвищення рН у концентраті (рис. 4). Проте при концентраціях $100 - 900 \text{ mg/dm}^3$ навпаки, спостерігалось підвищення рН перміату в порівнянні з концентратом, хоча вміст фосфатів у концентратах у другому випадку зростав високих значень.

Очевидно при високих значеннях рН, коли вміст гідроксил аніонів був значним, їх дифузія через мембрану була кращою, в порівнянні з фосфатами. У нейтральному середовищі навпаки спостерігалась краща дифузія протонів у порівнянні із катіонами натрію.

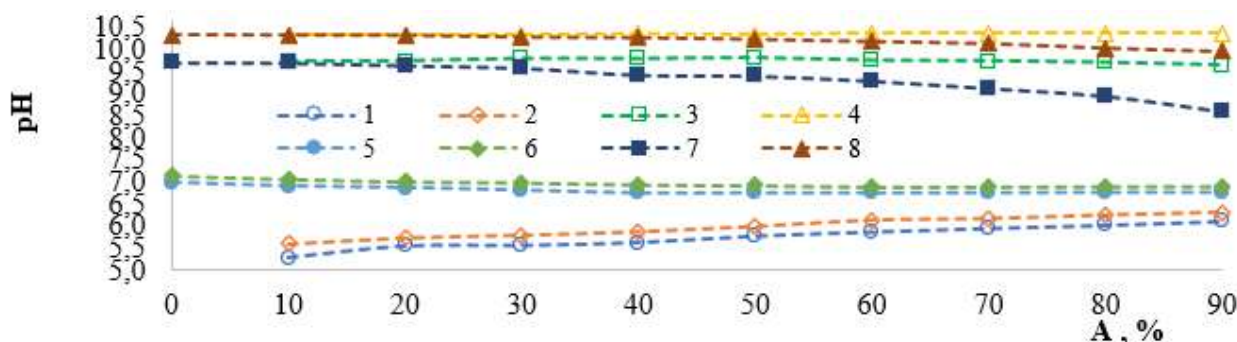


Рис. 4 – Залежність рН середовища у перміаті (1; 2; 3; 4) та концентраті (5; 6; 7; 8) при робочому тиску 4,0 атм. в залежності від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотньоосмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів Na_3PO_4 при вихідних концентраціях розчинів по фосфатах (мг/дм^3): 1,1 (1; 5), 10,0 (2; 6), 100,0 (3; 7), 900,0 (4; 8)

Продуктивність та селективність при концентрації фосфатів 1,1 – 900,0 мг/дм^3 по фосфатам зворотньоосмотичної мембрани була досить високою (рис. 5). Продуктивність мембрани Filmtec TW30-1812-50 в значній мірі залежить від початкової концентрації фосфатів у розчині. Підвищення концентрації фосфатів у вихідному розчині призводить до зниження продуктивності даної мембрани. Таку ж залежність спостерігаємо і при підвищенні ступеню відбору перміату від 10 до 90 %. Це пояснюється зростанням осмотичного тиску розчинів при підвищенні концентрації компоненту та явищами концентраційної поляризації на поверхні мембрани, вклад яких у процес зростає при зростанні ступеню відбору перміату до 70-90%.

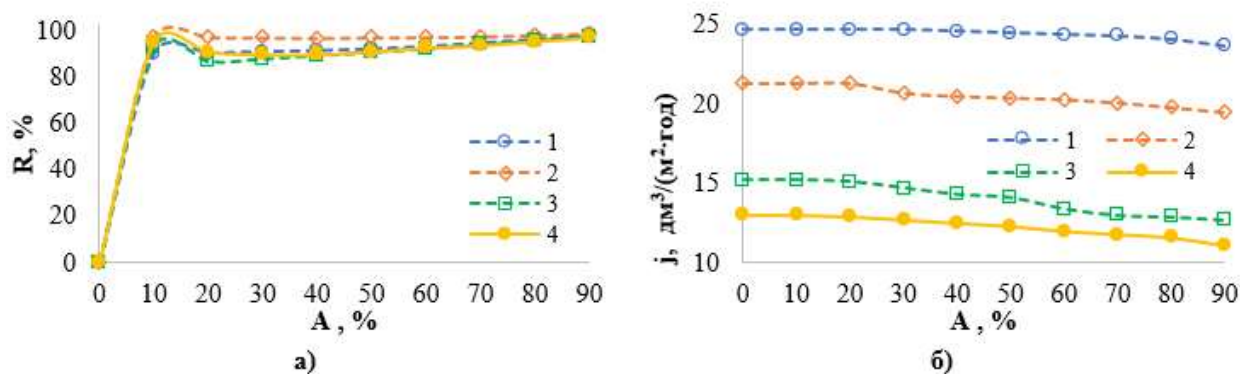


Рис. 5 – Залежність продуктивності і селективності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотньоосмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів Na_3PO_4 при вихідних концентраціях розчинів по фосфатах (мг/дм^3): 1,1 (1), 10,0 (2), 100,0 (3), 900,0 (4): а) селективність; б) – продуктивність

Використання зворотньоосмотичної мембрани низького тиску дозволяє ефективно вилучати фосфати, з артезіанської води при їх вихідній концентрації 23,1 мг/дм^3 . Оскільки концентрація фосфатів $\leq 10,0 \text{ мг/дм}^3$ у стічних водах, тому зворотньоосмотичне очищення води дозволяє ефективно вирішити проблему очищення чи доочищення води до якості питної. До того ж, зворотньоосмотична мембрана дозволяє ефективно пом'якшити воду при зниженні лужності, та ефективному вилученні з води фосфатів, сульфатів, та хлоридів (рис. 6).

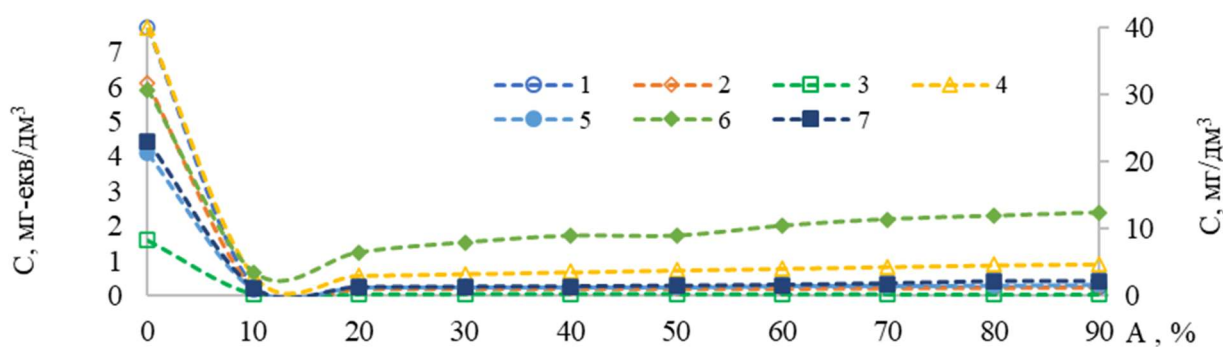


Рис. 6 – Зміна вмісту іонів жорсткості (1), кальцію (2), магнію (3), лужності (4), сульфатів (5), хлоридів (6) та фосфатів (7) у перміаті при фільтруванні розчину Na_3PO_4 з початковою концентрацією Na_3PO_4 23,1 мг/дм³ в артезіанській воді від ступеню відбору перміату (А, %) при робочому тиску 4,0 атм.

Ефективне очищення відбувається при ступеню відбору перміату до 90%. Проте при підвищенні ступені відбору перміату понад 70 % можливе осадотворення на мембрані за рахунок карбонатів іонів жорсткості. Про це свідчить різниця визначених та розрахованих значень жорсткості і лужності в концентраті (рис. 8). Проте при коригуванні ступеню відбору перміату та застосування антискалантів і періодичної кислотної промивки поверхні мембрани можна уникнути осадотворення.

Скид такого концентрату можливий в каналізацію, оскільки концентрації хлоридів та сульфатів є відносно невисокими у воді, що підтверджується як експериментальними, так і теоретично розрахованими даними.

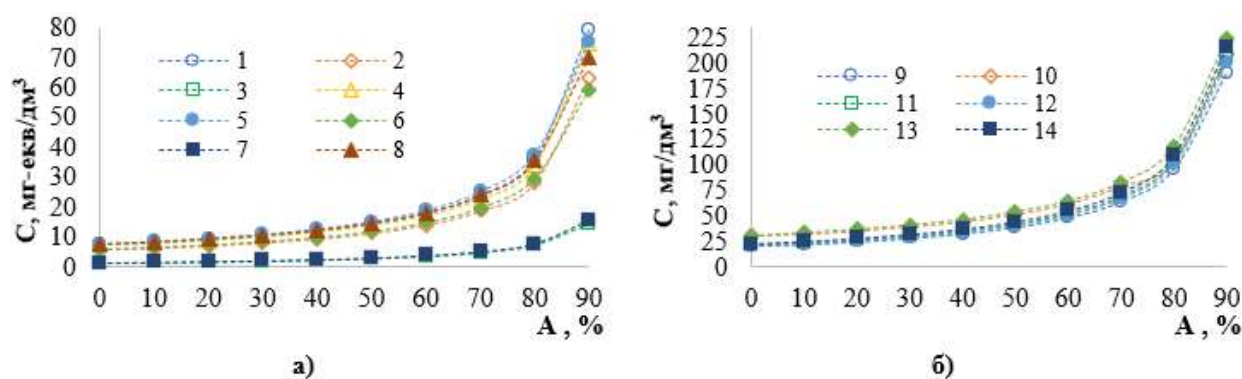


Рис. 7 – Зміна вмісту іонів жорсткості (1; 5), кальцію (2; 6), магнію (3; 7), лужності (4; 8), сульфатів (9; 12), хлоридів (10; 13) та фосфатів (11; 14) у концентраті виміряних (1; 2; 3; 4; 9; 10; 11) та теоретично розрахованих (5; 6; 7; 8; 12; 13; 14) при фільтруванні розчину Na_3PO_4 з початковою концентрацією Na_3PO_4 23,1 мг/дм³ в артезіанській воді від ступеню відбору перміату (А, %) при робочому тиску 4,0 атм.

Селективність мембрани була високою по іонах жорсткості, лужності, сульфатах та фосфатах. Проте по хлоридах селективність була відносно невисокою, але це не є проблемою оскільки допустимий вміст даних аніонів у питній воді є досить високим, до того ж селективність підвищується зі збільшенням концентрації.

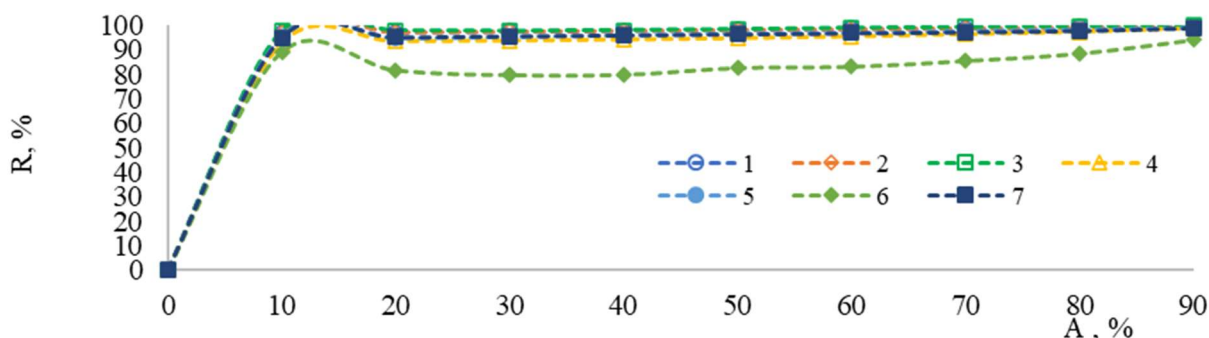


Рис. 8 – Залежність селективності по іонах жорсткості (1), кальцію (2), магнію (3), лужності (4), сульфатах (5), хлоридах (6) та фосфатах (7) при фільтруванні розчину Na_3PO_4 з початковою концентрацією Na_3PO_4 23,1 мг/дм³ в артезіанській воді від ступеню відбору перміату (A, %) при робочому тиску 4,0 атм.

Внаслідок кращої дифузії протонів в порівнянні з іонами натрію через мембрану відбувається незначне підкислення перміату в порівнянні з концентратом (рис. 9). Продуктивність мембрани, як і у випадку фільтрування розчинів фосфату в дистильованій воді, є досить високою.

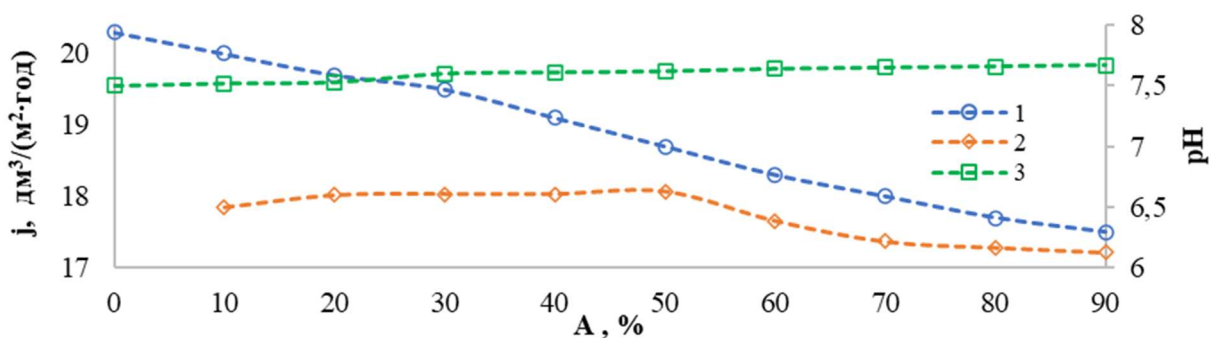


Рис. 9. Залежність продуктивності (1) та pH середовища перміату (2) та концентрату (3) при фільтруванні розчину Na_3PO_4 з початковою концентрацією Na_3PO_4 23,1 мг/дм³ в артезіанській воді від ступеню відбору перміату (A, %) при робочому тиску 4,0 атм.

Якщо розглядати зворотньоосмотичні установки як надійні засоби підвищення якості питної води, то у випадку видалення фосфатів води є цілком перспективними, тому що вміст фосфатів у водопровідній, артезіанських та ґрунтових та поверхневих водах практично ніколи не перевищує концентрацію в 10 мг/дм³. А проведені дослідження з використанням розчинів фосфатів у артезіанській воді показали високу ефективність методу при очищенні води не лише від сульфатів, але і інших компонентів води. Практично всі присутні компоненти ефективно видалялись із води і їх концентрації у перміаті були значно нижчими, за допустимі рівні для питної води.

Отже, при відносно невисоких концентраціях фосфатів у нейтральному водному середовищі використання зворотньоосмотичної мембрани низького тиску TW30-1812-50 дозволяє ефективно очищати води від фосфатів та інших поліютантів, присутніх у воді.

Висновки. З проведених досліджень можемо сказати, що зворотньоосмотична мембрана низького тиску дозволяє ефективно вилучити фосфати з модельних розчинів ортофосфату натрію у воді. При підвищенні концентрації фосфатів від 10 до 100-900 мг/дм³ внаслідок підключення води спостерігається незначне зниження ефективності їх вилучення.

При очищенні артезіанської води, що містить фосфат натрію, вдалось досягти ефективного вилучення з води фосфатів, сульфатів, хлоридів, нітратів та іонів жорсткості при ступені відбору перміату 10–90%. Проте підвищення ступеню відбору перміату понад 70% є небажаним, через можливість утворення карбонатних відкладень на мембрані.

Перспективи подальших досліджень. Отримані результати дозволяють використання зворотньоосмотичної мембрани низького тиску Filmtec TW30-1812-50 для очищення природних вод від фосфатів. В подальших дослідженнях доцільно вивчити можливість переробки концентратів зворотньоосмотичного очищення води від фосфатів реагентним методом з отриманням мінеральних добрив.

Список використаної літератури

1. Ni F., He J., Wang Y., & Luan Z. Preparation and characterization of a cost-effective red mud/polyaluminum chloride composite coagulant for enhanced phosphate removal from aqueous solutions. 2015. Journal of Water Process Engineering. Vol. 6. P. 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.04.003>
2. Owodunni A. A., Ismail S., Kurniawan S. B., Ahmad A., Imron M. F., Abdullah S. R. S. A review on revolutionary technique for phosphate removal in wastewater using green coagulant. Journal of Water Process Engineering. 2013. Vol. no 52. P. 103573. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103573>
3. Franco D., Lee J., Arbelaez S., Cohen N., Kim J.Y. Removal of phosphate from surface and wastewater via electrocoagulation. Ecological Engineering, 2017. Vol. 108. P. 589-596. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.031>
4. Delgadillo-Mirquez L., Lopes F., Taidi B., Pareau D. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. Biotechnology reports. 2016. Vol. 11. P.18-26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>
5. Wu B., Fang L., Fortner J. D., Guan X., Lo I. M. Highly efficient and selective phosphate removal from wastewater by magnetically recoverable La (OH)₃/Fe₃O₄ nanocomposites. Water research. 2017. Vol. 126. P. 179-188. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05569>
6. Gomelya N., Petrychenko A., Trokhimenko A., Martyniuk Y. Study of using the anionites in low-waste processes of water purification from phosphates. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3(10). P. 36-41. [doi:10.15587/1729-4061.2017.101400](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101400).
7. Fang D., Huang L., Xiao H., Wu G., Zeng Z., Wang X., ... & Ji F. Layered double hydroxide membranes for advanced removal of phosphate from wastewater. Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 451, P. 138600. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138600>

Mykola Gomelya, Inna Trus, Anna Vakulenko, Arsenii Taranenko

RESEARCH OF PHOSPHATE REMOVAL FROM WATER ON REVERSE OSMOTIC FILTERS

Eutrophication of natural water bodies caused by an excess of biogenic substances is one of the global environmental problems of modern times. Usually, phosphorus is a limiting biogenic element, the concentration of which determines the intensity of eutrophication processes in water bodies. Therefore, it is important to develop methods aimed at preventing excessive amounts of phosphates from entering the environment. To remove phosphates from water, typically used biological degradation technologies, which usually proceed very slowly and depend on the conditions under which the process takes place. Also, Biogenic elements can be removed by using ion exchange, reverse osmosis, and chemical methods. However, the disposal of concentrated solutions becomes an issue with these methods. Baromembrane purification methods, particularly reverse osmosis, are becoming increasingly important in the field of water treatment and purification and are essential in creating efficient and low-waste complex technologies for

water purification from biogenic compounds. The study investigated the processes of removing orthophosphates from distilled and artesian water using a low-pressure reverse osmosis membrane Filmtec TW30-1812-50. The dependence of membrane productivity and selectivity on the concentration of phosphates and the degree of permeate rejection was determined. Was found that residual concentrations of phosphates in the permeate increase with the increase in the degree of permeate rejection. The lowest residual concentrations of phosphates were observed at the initial concentration of up to 10 mg/dm³. The highest residual phosphate concentrations were observed at initial concentrations above 900 mg/dm³. At the same time, the membrane productivity constantly decreased with increasing feed concentration and degree of permeate recovery due to the increased osmotic pressure on the membrane. The selectivity of the membrane was highest at an initial concentration of up to 10 mg/dm³ and slightly decreased at a rejection rate of 20-50% for initial phosphate concentrations of 100-900 mg/dm³. At the maximum degree of permeate rejection (90%), the selectivity of the membrane reached 97-99 % and decreased with an increase in phosphate concentrations, which is due to a change in the pH of the medium, hydrolysis of phosphates, hydration of ions, and concentration polarization. The membrane selectivity for phosphates in solutions in artesian water was slightly lower (95-99 %), which was due to the competing influence of chlorides, sulfates, and bicarbonates, as well as a decrease in the pH of the solution to 7.52-7.67, which promotes the hydrolysis of o-phosphates.

Keywords: phosphates, membrane, reverse osmosis, productivity, selectivity, permeate, concentrate.

References

1. Ni, F., He, J., Wang, Y., & Luan, Z. (2015). Preparation and characterization of a cost-effective red mud/polyaluminum chloride composite coagulant for enhanced phosphate removal from aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, no 6, pp. 58-165.
2. Owodunni, A. A., Ismail, S., Kurniawan, S. B., Ahmad, A., Imron, M. F., & Abdullah, S. R. S. (2023). A review on revolutionary technique for phosphate removal in wastewater using green coagulant. *Journal of Water Process Engineering*, no 52, pp.103573.
3. Franco, D., Lee, J., Arbelaez, S., Cohen, N., & Kim, J. Y. (2017). Removal of phosphate from surface and wastewater via electrocoagulation. *Ecological engineering*, no 108, pp. 589-596.
4. Delgadillo-Mirquez, L., Lopes, F., Taidi, B., & Pareau, D. (2016). Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology reports*, no 11, pp.18-26.
5. Wu, B., Fang, L., Fortner, J. D., Guan, X., Lo, I. M. (2017). Highly efficient and selective phosphate removal from wastewater by magnetically recoverable La (OH)₃/Fe₃O₄ nanocomposites. *Water research*, no 126, pp. 179-188.
6. Gomelya, N., Petrychenko, A., Trokhimenko, A., & Martyniuk, Y. (2017). Study of using the anionites in low-waste processes of water purification from phosphates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no 3(10), pp. 36-41.
7. Fang, D., Huang, L., Xiao, H., Wu, G., Zeng, Z., Wang, X., ... & Ji, F. (2023). Layered double hydroxide membranes for advanced removal of phosphate from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, no 451, pp. 138600.